



#3

- 1 -

Docket: 3411-4

**CERTIFICATE OF MAILING**

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service with postage as First Class Mail in an envelope addressed to: Assistant Commissioner for Patents, Washington, D.C. 20231, on July 21, 2000

Cameron S. Gilligan

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

In re PATENT application of )  
Shizuo SUMIDA et al. )  
Serial No. 09/551,867 ) Art Unit:  
Filed: April 18, 2000 ) Examiner:  
For: NON-LINEAR CHARACTERISTIC REPRODUCING )  
APPARATUS AND NON-LINEAR CHARACTERISTIC )  
REPRODUCING PROGRAM STORAGE MEDIUM )

**TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENT**

Assistant Commissioner for Patents

Washington, D.C. 20231

Sir:

At the time of filing the above-referenced application, the benefit of foreign priority under 35 USC 119 was claimed in the following:

<u>COUNTRY</u>	<u>APPLICATION NO.</u>	<u>FILING DATE</u>
Japan	11-301246	October 22, 1999

Submitted herewith is a certified copy of the priority document to perfect the claim of priority.

Acknowledgment is respectfully requested.

Respectfully submitted,

Jeffrey L. Costellia  
Registration No. 35,483

NIXON PEABODY LLP  
8180 Greensboro Drive, Suite 800  
McLean, Virginia 22102  
(703) 790-9110



# 日 本 国 特 許 庁

PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日

Date of Application:

1999年10月22日

出 願 番 号

Application Number:

平成11年特許願第301246号

出 願 人

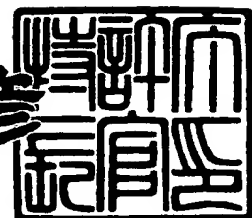
Applicant (s):

角田 鎮男  
長松 昭男  
株式会社小野測器

2000年 5月12日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

近 藤 隆 彦



出証番号 出証特2000-3035153

【書類名】 特許願

【整理番号】 0S099004

【特記事項】 特許法第 3 0 条第 1 項の規定の適用を受けようとする特  
許出願

【提出日】 平成11年10月22日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 17/50

【発明の名称】 非線形特性再現装置

【請求項の数】 9

【発明者】

【住所又は居所】 広島県広島市安芸区矢野西 1 - 1 5 - 4

【氏名】 角田 鎮男

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県鎌倉市津 6 0 3 - 6 1

【氏名】 長松 昭男

【特許出願人】

【住所又は居所】 広島県広島市安芸区矢野西 1 - 1 5 - 4

【氏名又は名称】 角田 鎮男

【特許出願人】

【住所又は居所】 神奈川県鎌倉市津 6 0 3 - 6 1

【氏名又は名称】 長松 昭男

【特許出願人】

【識別番号】 000145806

【氏名又は名称】 株式会社小野測器

【代理人】

【識別番号】 100094330

【弁理士】

【氏名又は名称】 山田 正紀

【選任した代理人】

【識別番号】 100079175

【弁理士】

【氏名又は名称】 小杉 佳男

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 017961

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9103233

【包括委任状番号】 9107579

【プルーフの要否】 要



【書類名】 明細書

【発明の名称】 非線形特性再現装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 所定の第 1 の状態量を入力し入力された第 1 の状態量に非線形変換を施すことにより第 2 の状態を生成して出力する非線形特性再現装置において、

第 1 の状態量の、次期標本化時期における推定観測量を入力して、次期標本化時期における第 2 の状態量が該推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を求める非線形特性再生部と、

前記非線形特性再生部で求められた前記規格化推定値に基づく非線形演算により、前記次期標本化時期における第 1 の状態量を該次期標本化時期における第 2 の状態量に変換する状態量変換部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

【請求項 2】 前記非線形特性再生部が、前記推定観測量を入力するとともに 1 つ以上の変数を入力し、これら入力された推定観測量および 1 つ以上の変数に基づいて、前記第 2 の状態量を求めるものであることを特徴とする請求項 1 記載の非線形特性再現装置。

【請求項 3】 前記非線形特性再生部は、前記第 2 の状態量の推定値を前記推定観測量の絶対値で除算又は微分することにより前記規格化推定値を求めるものであることを特徴とする請求項 1 記載の非線形特性再現装置。

【請求項 4】 線形系を再現する線形モデル部と、該線形モデル部から所定の第 1 の状態量を受け取り受け取った第 1 の状態量に非線形変換を施すことにより第 2 の状態量を生成して前記線形モデル部に戻す非線形モデル部とを備え、

前記線形モデル部は、次期標本化時期における非線形変換特性の再生と、再生された非線形変換特性に基づいた、第 1 の状態量の第 2 の状態量への変換とを交互に繰り返すものであることを特徴とする非線形特性再現装置。

【請求項 5】 前記非線形モデル部は、前記線形モデル部から受け取る第 1 の状態量の種類に応じた非線形変換特性の再生と第 1 の状態量の第 2 の状態量への変換とを交互に繰り返す、第 1 の状態量の種類に対応した非線形変換部を複数

有するものであることを特徴とする請求項 4 記載の非線形特性再現装置。

【請求項 6】 所定の第 1 の状態量を入力して入力された第 1 の状態量を切り替えて第 2 の状態量として出力する非線形特性再現装置において、

1 つ以上の変数を入力して入力された 1 つ以上の変数に基づいて次期標本化時期における、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める論理判定部と

、  
前記論理判定部で求められた論理値に基づいて、前記次期標本化時期における第 1 の状態量を切り替えて第 2 の状態量として出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

【請求項 7】 所定の第 1 の状態量を入力し、入力した第 1 の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第 2 の状態量を出力する非線形特性再現装置において、

前記第 1 の状態量の、現在の標本化時期から次期標本化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

前記第 1 の状態量の、現在の標本化時期における値と該第 1 の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

前記状態変動推定部で予測された状態量変動幅の絶対値と前記状態偏差検出部で求められた偏差の絶対値との大小に基づいて次期標本化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

前記安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第 2 の状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする非線形特性再現装置。

【請求項 8】 前記状態偏差検出部は、前記第 1 の状態量の現在の標本化時期における値と、該第 1 の状態量が所定の状態にあるか否かを判定するための、前記状態変動推定部で予測された状態量変動幅の正負に応じて異なる判定値との偏差を求めるものであることを特徴とする請求項 7 記載の非線形特性再現装置。

【請求項 9】 製品や部品が包含するパラメータ群が形成する閉鎖系の固有値による過渡応答特性が、機械振動などの急激な変化をする系と、温度変化などの緩慢な挙動変化をする系が混在する系において、前者の系に影響を与えない過

渡応答特性の領域を後者の系として分離し、定常状態の変動幅を生成する定常値設定部、この定常変動幅を入力とする緩慢な挙動変化を指数関数・畳み込み積分・ヘリモイド関数などで0から1.0の無単位量であるいは定められた指定値AからBの範囲内で応答を再現する正規化応答部、この応答結果とその他の物理現象を再現するモデルを組み合わせ非線形特性値を生成する特性生成部、入出力状態量間を変換する状態量変換部で構成する、製品や部品の緩慢な過渡応答を時刻層で変換する非線形特性として再現する非線形特性再現装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、シミュレーション上、状態量に非線形変換を施して出力する非線形特性再現装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

設計開発の対象であり目的である製品や部品の大半は、その内部に非線形な性質を含み、企画から設計を経て試作試験に至る製品開発の全過程を通して、避けることができない課題である。しかし、この製品開発の全域に影響を及ぼす非線形性には、製品開発にとって障害になる面と有益な2通りの面があり、大変重要な意味を持っている。まず障害となる面には、不確定現象の原因となり、それが製品の機能に影響して性能と信頼性を悪化させることが多く、このような非線形性は極力排除するか製品への影響を回避しなければならない。次に有益な面は、非線形ばね・半導体・リンク機構・クラッチ機構など、線形特性からは得られない機能と特性の創生と実現の手段として積極的に利用されることも多く、このような場合には非線形性の存在が不可欠であり、その活用が機能実現と性能達成の鍵となる。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

モデル化に当たっては、この実体が持つ非線形性を忠実に再現する必要がある。しかし、有限要素法を始めとする従来のモデル化手法の大部分は、元来線形な

系を対象に発達したので、それによる非線形性の扱いは一般には困難かつ面倒であった。そのために従来の製品モデルにおいては、非線形性を最初から省略するか近似または平均化された等価線形性として扱われるのが普通であった。そして、非線形性が性能に大きく影響する場合や非線形性を利用して必要機能を実現する場合には、複雑で一般性のない数値処理法を用いるか、あるいは熟練技術者の勘と経験に頼り個別に対応せざるを得なかった。このことがモデル化を困難にし、製品開発のコンピュータ援用を阻害する要因の一つにもなっていた。しかし、実際の製品には種々雑多な非線形性があり、これを全て共通の理論を導いて解くことは困難である。

## 【 0 0 0 4 】

本発明は、上記事情に鑑み、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いを再現する非線形特性再現装置を提供することを目的とする。

## 【 0 0 0 5 】

## 【課題を解決するための手段】

上記目的を達成する本発明の第 1 の非線形特性再現装置は、

所定の第 1 の状態量を入力し入力された第 1 の状態量に非線形変換を施すことにより第 2 の状態を生成して出力する非線形特性再現装置において、

第 1 の状態量の、次期標本化時期における推定観測量を入力して、次期標本化時期における第 2 の状態量がその推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を求める非線形特性再生部と、

非線形特性再生部で求められた規格化推定値に基づく非線形演算により、次期標本化時期における第 1 の状態量を次期標本化時期における第 2 の状態量に変換する状態量変換部とを備えたことを特徴とする。

## 【 0 0 0 6 】

ここで、上記本発明の第 1 の非線形特性再現装置において、上記非線形特性再生部は、上記推定観測量を入力するとともに 1 つ以上の変数を入力し、これら入力された推定観測量および 1 つ以上の変数に基づいて、上記第 2 の状態量を求めるものであってもよい。

## 【 0 0 0 7 】

あるいは、1つの変数に基づいて複数の第2の状態量を求めるものであってもよい。

## 【0008】

また、上記本発明の第1の非線形特性再現装置において、非線形特性再生部は、上記第2の状態量の推定値を上記推定観測量の絶対値で除算又は微分することにより規格化推定値を求めるものであってもよい。

## 【0009】

この第1の非線形特性再現装置は、非線形な物理現象や挙動を生成する1対の入出状態量を有する状態量変換部（特性・係数・側負荷）と、この状態量変換部の非線形特性を支配する入力状態量を有する非線形特性再生部で構成される非線形特性再現装置において、後者の非線形特性再生部の出力特性値又は数学モデルを、前者の状態量変換部に入力される次期標本化時期の状態量の絶対値で除算または微分して、その結果を後者の状態量変換部に代入して製品又は部品の非線形な物理現象を再現する装置（モデル）、のように表現することもできる。

## 【0010】

図1は、本発明の第1の非線形特性再現装置の原理説明図である。

## 【0011】

図1の右側は、状態変換部Rが抵抗係数・電気容量・質量・リンク伝達係数などの特性値、入出力状態量 $v \cdot f$ が電圧・速度・力・電流・などの状態量である。この状態変換部Rは、入力状態量 $v$ を出力状態量 $f$ に変換する。また、同図の左側の非線形特性再生部には、状態量変換部に加えられている入力状態量 $v$ の次期標本化時期における推定観測量 $v_-$ （白抜き半円記号）と、その他の外部状態量 $v_1 \cdot f_1$ や外部信号 $S_1$ が入力される。これらの入力状態量によって非線形特性再生部内部には、次期標本化時期の出力状態量の推定値 $f_- = (v_-, v_1, S_1, f_1)$ が生成される。この出力状態量 $f_-$ を前記の推定観測量 $v_-$ で除算又は微分して、次期標本化時期における状態変換部の特性 $R_p$ の予測値を生成する。この $R_p$ を状態変換部Rに代入（点線の矢印）した後に、状態変換部が組み込まれた全系モデルの計算を実行する。この操作を標本化時期毎に繰り返し実行することで、製品や部品の非線形な物理現象や振る舞いを時刻暦データとして再現で

きる。

【0 0 1 2】

後述する、「非線形理論からのモデル化」、「空気ばねのモデル化例」、および「揺動機構」は、この第 1 の非線形特性再現装置の実施形態に相当する。

【0 0 1 3】

また、上記目的を達成する本発明の第 2 の非線形特性再現装置は、線形系を再現する線形モデル部と、その線形モデル部から所定の第 1 の状態量を受け取り受け取った第 1 の状態量に非線形変換を施すことにより第 2 の状態量を生成して線形モデル部に戻す非線形モデル部とを備え、

上記線形モデル部は、次期標本化時期における非線形変換特性の再生と、再生された非線形変換特性に基づいた、第 1 の状態量の第 2 の状態量への変換とを交互に繰り返すものであることを特徴とする。

【0 0 1 4】

ここで、上記第 2 の非線形特性再現装置において、上記非線形モデル部は、線形モデル部から受け取る第 1 の状態量の種類に応じた非線形変換特性の再生と第 1 の状態量の第 2 の状態量への変換とを交互に繰り返す、第 1 の状態量の種類に対応した非線形変換部を複数有するものであってもよい。

【0 0 1 5】

この第 2 の非線形特性再現装置は、製品や部品群が包含する複数の非線形系を統合する数学的な解法が困難とされる非線形系を再現する装置において、系の特性値が状態量と比例関係になる線形パラメータ群を関係付けて再現させる線形モデル部と、入力状態量の乗べき・乗根・指数・対数などの値に比例した状態量を出力する非線形パラメータ群を、物理現象単位に又は複数の物理現象を 1 単位として再現する複数の部分的な非線形特性再現装置群（モデル）に分け、これを前記の線形モデル部に組み込み全系内部に包含（点在）する複数の非線形系な物理現象を再現する装置、のように表現してもよい。

【0 0 1 6】

図 2 は、本発明の第 2 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【0 0 1 7】

この図 2 には、本発明の第 1 の非線形特性再現装置の考え方を全体の系に適用する時のモデル構成を示す。従来の非線形のモデル化では、各特性や係数など出力状態量が入力状態量の指数・対数・2 乗などの関数値に支配されるため、複数の非線形な物理現象を数学的にモデル統合して解くことは困難であった。しかし、この方法を利用すると、各非線形な物理現象を生成するパラメータ（特性・係数・側付加）が、計算を実行する前に状態量変換部  $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$  の予測値を求めてセットアップするので、全系モデルを実行する瞬間では、状態量変換部  $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$  の特性値を線形と見なして計算することができる。

【0 0 1 8】

後述する、「ゼネバ機構」および「燃料残量警告灯のモデル化」は、この第 2 の非線形特性再現装置の実施形態に相当する。

【0 0 1 9】

また、上記目的を達成する本発明の第 3 の非線形特性再現装置は、所定の第 1 の状態量を入力して入力された第 1 の状態量を切り替えて第 2 の状態量として出力する非線形特性再現装置において、

1 つ以上の変数を入力して入力された 1 つ以上の変数に基づいて次期標本化時期における、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める論理判定部と

上記論理判定部で求められた論理値に基づいて、次期標本化時期における第 1 の状態量を切り替えて第 2 の状態量として出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする。

【0 0 2 0】

ここで、上記の「複数の離散的な値」は、例えば 2 値（‘0’ と ‘1’）であってもよく、3 値（‘0’ と ‘1’ と ‘-1’）であってもよく、このような複数の値をいう。

【0 0 2 1】

また、上記の「第 1 の状態量を切り替えて」とは、論理値が 2 値で表わされる場合における、例えば、第 1 の状態量の通過と切断とを切り替えたり、第 1 の状態量の流れを逆方向に切り替えたりすることや、論理値が 3 値で表わされる場合

における、例えば、第 1 の状態量の正方向への流れと、逆方向への流れと、流れの停止とを切り替えたりすることなど、第 1 の状態量を複数の状態のうちのいずれかの状態に切り替えることをいう。

【 0 0 2 2 】

この第 3 の非線形特性再現装置は、ばねの底付きやガタなど製品や部品の機構や構造から発生する、構造的に非線形な跳躍現象を伴う物理的な挙動変化を再現する装置において、速度・力・電圧・電流・圧力などの同一物理単位量を表す状態量間に、複数の離散的な論理値（例えば 1 (True) と 0 (false)）を持つ状態量切替部（係数）と、入力状態量（次期標本化時期の推定観測量）の挙動を論理的に判断して状態量切替部に論理値を代入する論理判定部を持ち、論理判定部から状態量切替部に 1 の論理値を代入した時は入出力状態量間を接続し、0 を代入した時は遮断する（あるいは 3 値の論理値の場合において ‘-1’ を代入したときは流れの方向を変える）というような操作を次期標本化時期の実行前に行って、モデルの構造を変更して（組替えて）から計算を実行する、構造非線形の挙動変化を再現する非線形再現装置、と表現することもできる。

【 0 0 2 3 】

図 3 は、本発明の第 3 の非線形再現装置の原理説明図である。

【 0 0 2 4 】

図 3 は、同一物理量の入出力状態量間に状態量を接続・遮断する状態量切替部（スイッチ要素） $S_w$  と、この状態量切替部を断続するための信号を生成する論理判定部で構成されている。状態量切替部は  $f = S_w v$  で表す線形の数学モデルとし、この式の  $S_w$  に論理判定部から 0 又は 1 の非線形な論理値  $S_{wL}$  を代入する。論理判定部には、判定するための状態量として、次期標本化時期の推定観測量が入力され、次期モデル状態を決定する論理値が生成される。この論理値を状態量切替部のスイッチ要素  $S_w$  に代入することによって、論理値が 0 の時は出力状態量が  $f = 0$  となり、1 の時は  $f = v$  となる。

【 0 0 2 5 】

図 3 の論理判定部は、 $\cup$  が OR、 $\cap$  が AND の論理演算子である。したがって、論理判定部の論理式は、状態量  $v_1$  と  $f_1$  が 0 以上を 1 その他は 0 とし、 $S_1$  を



0・1の論理値とすると、 $S_1$ または $f_1$ が1で $v_1$ が1の時に論理値1を生成し、状態切替部の出力状態量 $f$ と入力状態量 $v$ が結合される。

【0026】

後述する「構造非線形のモデル化」および「がた・底付きのモデル化」は、この第3の非線形再現装置の実施形態に相当する。

【0027】

また、上記目的を達成する本発明の第4の非線形再現装置は、所定の第1の状態量を入力し、入力した第1の状態量が所定状態にあるか否かに応じて非線形に切り替えられた第2の状態量を出力する非線形特性再現装置において、

第1の状態量の、現在の標本化時期から次期標本化時期に至る間の状態量変動幅を予測する状態変動推定部と、

第1の状態量の、現在の標本化時期における値とその第1の状態量が所定状態にあるか否かを判定するための判定値との偏差を求める状態偏差検出部と、

状態変動推定部で予測された状態量変動幅の絶対値と状態偏差検出部で求められた偏差の絶対値との大小に基づいて次期標本化時期における非線形変化を予測した、複数の離散的な値の中から選択される論理値を求める安定状態判定部と、

安定状態判定部で求められた論理値に基づいて切り替えられた第2の状態量を出力する状態量切替部とを備えたことを特徴とする。

【0028】

ここで、上記第4の非線形再現装置において、状態偏差検出部は、上記第1の状態量の現在の標本化時期における値と、その第1の状態量が所定の状態にあるか否かを判定するための、状態変動推定部で予測された状態量変動幅の正負に応じて異なる判定値との偏差を求めるものであることが好ましい。

【0029】

この第4の非線形再現装置は、速度の零値や加速から定常に移行した定常状態を判定して、特性値や状態量の切り替えを必要とする構造的な非線形を有する、製品や部品の再現装置において、現在の標本化時期の状態量と指定された判定値の偏差を求める状態偏差検出部、現在の標本化時期から次期標本化時期における状態量変動幅を予測する状態変動推定部、後者と前者の絶対値を比較して次期標

本化時期における判定結果を 0 又は 1 の論理値で予測して出力する安定状態判定部で構成する状態判定装置の予測値によって、次期標本化時期における状態量の断続又は特性・係数・側負荷の値を切り替えて、製品や部品に内在する構造非線性の物理的な跳躍現象を再現する非線形特性再現装置、のように表現することもできる。

## 【 0 0 3 0 】

図 4 は本発明の第 4 の非線形特性再現装置のブロック線図を示し、図 5 は第 4 の非線形特性再現装置の判定状態が図示してある。両図の各変数は、 $(k-1)$  が前の標本化時期、 $(k)$  が現在の標本化時期、 $(k+1)$  が次期標本化時期、以下  $+n$  で現在から将来の  $n$  次期標本化時期を表し、この  $k$  を添え字とする状態量  $v$  は、各時期の観測量を表す。また、図中の  $\Delta v$  は現在と次期標本化時期間の推定観測量の変動幅、 $V_s$  は現在の観測量  $v(k)$  と判定値  $V_{TH}$  との偏差、 $t_{smp}$  は標本化周期である。図 4 の安定状態判定部は、偏差  $V_s$  が変動幅  $\Delta v$  より小さい時は判定値を 1 とし、その逆は 0 とする。

## 【 0 0 3 1 】

従来は、指定された安定幅（不感帯）の範囲内に観測量があることで判定するため、標本化周期の変更や変動の激しい観測量などによって安定判断が不安定となる。ここで提案する安定幅（不感帯）を設けない判定法では、標本化周期や状態量の変動による不安定性が防止できる。

## 【 0 0 3 2 】

また、判定値  $V_{TH}$  に上下限を設けることで、状態量の上昇・下降に対しヒステリシスを持たし、より安定な判定も可能である。

## 【 0 0 3 3 】

後述する「構造非線形のモデル化」および「摩擦のモデル化例」は、この第 4 の非線形再現装置の実施形態に相当する。

## 【 0 0 3 4 】

また、上記目的を達成する本発明の第 5 の非線形再現装置は、製品や部品が包含するパラメータ群が形成する閉鎖系の固有値による過渡応答特性が、機械振動などの急激な変化をする系と、温度変化などの緩慢な挙動変化をする系が混在す

る系において、前者の系に影響を与えない過渡応答特性の領域を後者の系として分離し、定常状態の変動幅を生成する定常値設定部、この定常変動幅を入力とする緩慢な挙動変化を指数関数・畳み込み積分・ヘリモイド関数などで 0 から 1. 0 の無単位量であるいは定められた指定値 A から B の範囲内で応答を再現する正規化応答部、この応答結果とその他の物理現象を再現するモデルを組み合わせて非線形特性値を生成する特性生成部、入出力状態量間を変換する状態量変換部で構成する、製品や部品の緩慢な過渡応答を時刻暦で変化する非線形特性として再現する装置である。

【0 0 3 5】

図 6 は、本発明の第 5 の非線形再現装置の原理説明図である。

【0 0 3 6】

図 6 は、状態量  $S_2 \cdot S_3$  で生成した定常状態の変動値が 0 から 1 の応答範囲を持つ正規化応答部に入力され、正規化応答部の非線形な応答特性によって、定常状態の変動値を時刻暦で変化する非線形な応答値として再現される。その再現結果は、特性生成部に入力され状態量変換部の特性 R の変化に変換して代入され、緩慢な応答特性を全系の線形モデルの中で再現（反映）する。

【0 0 3 7】

この時刻暦応答再現装置によって、線形モデル内の複雑な過渡特性を支配する固有値から、緩慢な挙動をするエネルギー損失による温度上昇の影響や外気温度・気圧などの環境変化に対する影響を支配する固有値を、全系の線形モデルから除外して独立させることができる。ここで除外できる緩慢な過渡応答範囲は、線形モデル内の電気系や機械系の固有値を刺激しない範囲に限られる。

【0 0 3 8】

後述する「温度上昇のモデル化例」および「燃料残量警告灯のモデル化例」は、この第 5 の非線形再現装置の実施形態に相当する。

【0 0 3 9】

図 7 は、本発明の第 6 の非線形再現装置の原理説明図である。

【0 0 4 0】

上記目的を達成する本発明の第 6 の非線形再現装置は、製品や部品群が包含す

る非線形な物理現象の振る舞いや挙動を、上述した第 1 ～ 第 5 の装置を再現する構築手段、線形な挙動を再現する装置を再現する構築手段、これらのモデルを上述した第 2 の装置による全系の構築手段と数学モデルへの変換手段、これらの構築手段と構築結果及び入出力データを記憶する記憶装置と、これら構築手段で形成された装置群とその組み合わせ結果の描画および変更とデータ設定を行う入力装置、およびこの経過や入出力結果を表示する表示装置を有し、これらの記憶装置・入力装置・表示装置および装置群の構築、入出力データの処理及び数学モデルの実行を行う中央演算装置と、その途中経過と結果を一時的に記憶する一時記憶装置で構成された、製品や部品の非線形な物理現象を再現する装置である。

【 0 0 4 1 】

【発明の実施の形態】

以下、非線形性に関する説明と、それに続き本発明の実施形態について説明する。

【 0 0 4 2 】

非線形性は、この世で実用されているシステム・機械・構造物のすべてに含まれると言っても過言ではないほど、一般的な性質である。

【 0 0 4 3 】

例えば、モデルの特性や状態量に関連する非線形には、以下のようなものがあり、その存在場所・発生要因・依存因子・現象や振る舞いは種々雑多であり、全体として捕え所のない扱いにくく厄介な物でもある。

【 0 0 4 4 】

①存在場所については、材料内・部品同士の結合部や接触部・はめあい・軸受け・歯車・電磁石・半導体など、いたる所に存在する。

【 0 0 4 5 】

②発生要因については、物質や媒体と機構や構造に大別され、前者には剛性・減衰・電気抵抗・磁気などの非線形な特性、後者には自在継手・すきま・がた・摩擦などの構造的な非線形が含まれる。

【 0 0 4 6 】

③依存因子については、走行抵抗や空気ばねのように変位・速度・電流・電圧

などの状態量に依存するもの、温度や湿度のような環境に依存するもの、揺動機構のように幾何学的構造に依存するもの、がたや開閉器のように構造的な分離・結合に依存するものに分けられる。

【 0 0 4 7 】

これらの多岐に渡る非線形については、これまで過去から先人が努力と研究を重ね、解明されている非線形理論やモデルが数多くある。この発明は、この解明された非線形理論やモデルを製品や部品のモデルに融合させる方法を提示するものである。

【 0 0 4 8 】

非線形系を含む製品や部品のモデルは、当然のこととして線形と非線形のモデルで構成される。このうち、線形のモデル化は線形理論に基づいてモデル化し、線形代数で扱える数学モデルで表すことが条件になる。これに対し非線形な機能は、これらの線形性を考慮した上で、次の 2 つの面からモデル化して再現する必要がある。

【 0 0 4 9 】

一つは、製品や部品の機構や物理現象などの特徴と細部を機能として明らかにして行く過程で、特性・係数・側負荷（パラメータ）の値が線形な定数から状態量の影響を受けた、非線形な振る舞いのモデル化をすることである。この非線形は、系が受ける気圧や温度などの外部環境の影響も対象となる。ここでは、このような非線形を非線形パラメータと呼ぶ。

【 0 0 5 0 】

今一つは、圧縮ばねが底付きして剛体になる構造上の非線形や、自動車用クラッチの締結時はエンジンと車体が一体となり、開放時は両者が別々に運動する構造上の非線形など、製品や部品の構造や機構に起因する非線形である。この非線形は、モデル内部の状態量を直接接続・開放して、パラメータやモデル自身を切替えるモデル構造の非線形である。ここでは、この非線形を、構造非線形と呼ぶ。

【 0 0 5 1 】

以上から、非線形モデルは、状態量でパラメータ値が変化する非線形パラメー

たと、状態量を接続・開放してモデル構造を変える構造非線形に集約できる。

#### 【0052】

(非線形のモデル化手法)

##### (1) 機構モデル

非線形のモデル化には、特性の決定過程を部分的にモデル化する機構モデルを組み込み、結果を線形モデルのパラメータに代入することで、モデルの非線形化が実現可能である。非線形パラメータ値を変える機構モデルは、線形のモデルから独立した部分モデルとし、その数学モデルも独立させる必要がある。そして、非線形パラメータは、線形モデル上ではあくまでも線形パラメータとして扱い、線形理論の適用を可能にしておく。また、非線形モデルは、使用目的により精度や再現性が異なるので、同じ非線形でも複数のモデルを使い分ける必要がある。従って、機構モデルは入れ子方式による組み替えを可能にして置く必要がある。

##### (2) スイッチ要素

構造非線形のモデル化については、モデルの中に状態量の接続・開放操作を行うスイッチの働きをする要素を組み込むことで実現できる。このスイッチ要素は、モデルの状態量を直接操作することから、モデルの性質を決めるパラメータの1つと考えることができる。当然、このスイッチ要素は、線形の数学モデルの中に無単位量の0または1の値を持つ係数と同じ変数として扱われ、値が1の時に状態量を接続し、0の時に開放する働きをする。

#### 【0053】

また、このスイッチ要素は、次の状態量を予測してスイッチを操作する条件判定(式)の機構モデルを必要とする。この判定は、次の標本化時期におけるモデル内部の状態を推定する推定観測量から0又は1の操作量を生成してスイッチ要素を操作(代入)する。この操作によりモデルの実行前に内部接続を組み替えておく。従って、モデルが構造非線形であっても、系全体とその数学モデルは、あくまでも線形として扱える。

##### (3) 非線形を含むモデル

以上から非線形のモデル化手法は、次のようになる。線形モデルには、包含するパラメータに機構モデルを組み込み、非線形な振る舞を行うモデルに変える。

このモデルの過渡特性は、連続的に変化する非線形パラメータによって、系の固有値は連続性を持ち、応答も連続的に変化的である。また、スイッチ要素を包含する構造非線形のモデルには、次の状態を予測する機構モデルを組み込み、モデルの構造を非線形にする方法である。このモデルの過渡特性は、スイッチ要素によるモデル構造の接続・開放によって、系の固有値が不連続となり、応答に跳躍現象が現れることである。

【0054】

以上のことから機構モデルは、線形・非線形を問わず全て線形モデルとして、部品から製品および内部の物理現象までモデル化し、精密で再現性の良いモデル化が可能となる。また、機構モデルは、線形理論を適用するモデルから独立するので、統計モデルや回帰モデル・実験式・ファジーモデル・ニューラルネットワークなど、これまでの製品開発で利用されている多くのモデルが組み込み可能となる。このように非線形のモデル化は、製品・部品に共通する構造・機構や物理現象・支障内容など、過去から解明されて来た非線形理論・工学理論・モデル・蓄積技術などを横断的に適用する汎用性の高いモデル化を可能とする。当然、これらの内容は、全てコンピュータ上で実行して再現することが可能である。

(4) パラメータの非線形化

自動車の走行風による損失特性 $C_0$ は、速度 $v_d$ の2乗に比例した走行抵抗 $f_v$ を持つことが知られている。これを式で表すと $f_v = C_0 v_d^2$ となる。この式を速度 $v_d$ の積で表すと、 $f_v = C v_d$ の線形式と速度 $v_d$ に比例する非線形な損失特性 $C_v = C_0 v_d$ に分けることができる。この関係は、前者が系全体を線形で表す式、後者が非線形な損失特性を表す式となり、両者は、 $v_d$ を観測した観測量 $v_i = v_d$ と、 $C$ を $C_v$ に代入する結合条件式 $C = C_v$ で関係付けができる。以上の関係を、機能・機構モデルで表すと図8となる。

【0055】

図8は、走行速度 $v_1 \cdot v_2$ と駆動抵抗 $f_1 \cdot f_2$ の入出力状態量に走行風の損失特性 $C$ を持つ機能モデルを表し、この四角い枠に観測量 $v_i$ を入力して非線形損失特性 $C_v$ を生成する機構モデルをグラフとモデルで表現している。同図(a)は、速度の観測量 $v_i$ の絶対値に比例する非線形損失特性 $C_v$ の関係を、横軸(

X軸)を速度  $v_i$ 、縦軸 (Y軸) を非線形損失特性  $C_v$  で表したグラフである。また同図 (b) は、同じ内容を図 6 0 と図 6 1 の記号で非線形損失特性  $C_v$  をモデル化して表した例である。この両モデルは、非線形損失特性  $C_v$  の機構モデルを除くと、線形の位差損失特性の基本機能要素そのものである。尚、ここでは、推定観測量については触れない、詳しくは後の事例で述べる。

【0 0 5 6】

図 8 の機能モデルと機構モデルを組み込む結合条件は、次の数学モデルとなる。

【0 0 5 7】

【数 1】

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} f_1 \\ v_2 \\ v_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -C & 1 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\ v_i &= v_d \\ C &= C_v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

【0 0 5 8】

式 (1) は、1 行目が機能モデルの支配方程式、2 行目が観測量の結合条件式、3 行目が損失特性を代入する結合条件式である。

機能モデルに組み込む機構モデルは、次の数学モデルとなる。

【0 0 5 9】

【数 2】

$$C_v = C_0 |v_i| \quad (2)$$

【0 0 6 0】

式 (1) 1 行目の支配方程式には、2 行目と 3 行目の結合条件式を介して、式 (



2) の非線形パラメータを決定する機構モデルの数学モデルを組み込むことができる。

#### (5) 非線形理論からのモデル化

これまで述べた非線形パラメータのモデル化について更に考察する。図8の例では、式(12)の速度  $v_i$  に比例する非線形損失特性  $C_v$  を機構モデルとし、走行風の損失が速度の2乗に比例することを利用して式を分けた。しかし、このような例は、現実の非線形モデルでは少なく、従来から明らかにされている非線形モデルから直接機構モデルに変換する、一般的な方法が望まれる。その考え方としては、計算の実行前に非線形パラメータに加えられる状態量で非線形モデルを除算または微分すれば、機構モデルのモデル化が可能である。例として、図8のモデルをこの方法で表すと、その機構モデルは図9となる。尚、同図下側のタイヤの動摩擦力  $F_T$  については、後で説明する。

【0061】

図9の上側に示す枠内の機構モデルは、(a) が数式表現、(b) がモデル表現で、両モデルには、速度  $v_d$  の次期標本化時期の推定観測量  $v_{i-}$  入力されている。図9(a)の走行風抵抗の式  $f_v = C_0 V_{i-}^2$  を一般化して関数  $f_v = fnc(V_{i-})$  で表すと、同図(a)・(b)の走行風抵抗力  $f_v$  は、次の数学モデルで表せる。

【0062】

【数3】

$$\left. \begin{aligned} f_v &= \left( fnc(v_{i-}) \frac{1}{|v_{i-}|} \right) v_d \\ v_{i-} &= 2v_{d(k)} - v_{d(k-1)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

【0063】

式(3)は、上側が関数で表した走行風抵抗力  $f_v$  でカッコ内の式が機構モデル、下側が速度  $v_d$  の推定観測量  $v_{i-}$  の式である。推定観測量  $v_{i-}$  は、現在の標本化時期の速度を  $v_{d(k)}$  と前回の標本化時期の速度  $v_{d(k-1)}$  から求めた速度差を

使って、次回の標本化時期の速度  $v_{d(k+1)}$  を推定する離散系による近時値である。推定速度  $v_{i-}$  の絶対値は、非線形損失特性  $C$  の入力速度  $v_d$  の推定観測量  $v_{i-}$  である。式 (3) の変換が適用できるのは、特性・係数・側負荷に限られる。また、図 9 の機構モデルに、複数の状態量が入力されても方法は同じである。

【0 0 6 4】

図 9 の機能モデルは、次の数学モデルで表すことが出来る。

【0 0 6 5】

【数 4】

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} f_1 \\ v_2 \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C & 1 & F_{T0}S_{WT} \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ f_2 \\ 1 \end{bmatrix} \\ v_{i-} = v_d \\ C = C_v \end{array} \right\} \quad (4)$$

【0 0 6 6】

式 (4) は、上側が支配方程式を示し、下側が機能モデルと機構モデル間の結合条件式である。式 (3) の上側で表した関数の機構モデルは、次の数学モデルになる。

【0 0 6 7】

【数 5】

$$C_v = C_0 v_{i-}^2 \frac{1}{|v_{i-}|} \quad (5)$$

【0 0 6 8】

(6) 構造非線形のモデル化

次に、図 9 の下側にあるタイヤ動摩擦力  $F_T$  のモデルは、動摩擦力  $F_{T0}$  の側負荷を条件判定  $S_{WT}$  が推定観測量  $v_{i-}$  から車の停止と走行を予測してスイッチ要素

$S_{WT}$  を操作する構造非線形のモデルである。この構造非線形は、速度が  $v_{i-} = 0$  のときは条件判定  $S_{WT} = 1$  となりスイッチ要素  $S_{WT}$  を  $On$  にして側負荷  $F_{T0}$  を開放する、逆に速度が  $v_{i-} = 0$  のときは接続する。その結果は、タイヤの動摩擦力  $F_T$  として走行風抵抗  $f_v$  に加算される。

図 9 の条件判定式とタイヤの動摩擦力は、次のようになる。

【 0 0 6 9 】

【数 6】

$$\left. \begin{aligned} & f(v_{i-} = 0) \text{ then } (S_{WT} = 1) \text{ else } (S_{WT} = 0) \\ & F_T = S_{WT} F_{T0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

【 0 0 7 0 】

式 (6) は、上側が条件判定式、下側がタイヤの動摩擦力で式 (4) の上側の式に組み込まれているものと同じである。

【 0 0 7 1 】

ここで、式 (13) の零速度の判定を例に条件判定の方法を補足しておく。条件判定には、状態量の零値や指定値を設けて判定することが多くある。計算誤差を含む実際のシミュレーションでは、この判定を数学的に判定することは難しく、判定に失敗すると状態量が標本化周期に同期して振動を起こすことがある。例えば式 (6) において、計算誤差を避けるために一定範囲内の速度を零としても、標本化周期の変更や加速度の大小によっては振動現象が発生する。これを避ける方法の一つに、現在 ( $k$ ) の速度  $v_{d(k)}$ 、前回の標本化周期 ( $k-1$ ) との速度差  $\Delta v_d$ 、次回の標本化時期 ( $K+1$ ) の速度  $v_{d(k+1)}$  から、速度零への安定を予測して判定する方法がある。この条件判定を示すと、次のようになる。

【 0 0 7 2 】

【数 7】

$$\left. \begin{array}{l} \Delta v = v_{d(k)} - v_{d(k-1)} \\ \text{if } (|v_{d(k)} - V_{TH}| \leq |\Delta v|) \text{ then } (S_{WT} = 1) \text{ else } (S_{WT} = 0) \end{array} \right\} \quad (7)$$

【0 0 7 3】

式(7)は、上側が前回との速度差、下側が条件判定式である。同式の各変数は、 $v_{d(k)}$ が現在の速度、 $V_{TH}$ が判定基準値、 $v_{d(k-1)}$ が前回の標本化時期の速度、 $\Delta v$ が前回との速度差である。同式の下側の $S_{WT}$ が速度0の判定条件で、条件を満たせば $S_{WT} = 1$ となり、その他は $S_{WT} = 0$ となる。尚、零速度の判定基準値を $V_{TH} = 0$ とすればよい。判定のアルゴリズムは、速度差 $\Delta v$ が判定基準値 $V_{TH}$ を現在の速度 $v_{d(k)}$ と次の標本化時期の速度 $v_{d(k+1)}$ が跨いだ状態を判定する。すなわち、速度差 $\Delta v$ を判定基準幅にして、現在の速度 $v_{d(k)}$ がその範囲内にあることを判定する。従って、速度停止や目標値への収束状態を判定しながらスイッチ要素を操作する条件判定などでは、判定幅を順次減少させながら収束するので、判定基準値と被判定状態量間の残差が少ない収束状態を得ることが可能であり、また、判定値を境に標本化周期に同期して起こる振動を収束させることもできる。

【0 0 7 4】

また、条件判定には、判定基準値に幅を持たして判定結果を安定にする方法が良く用いられる。式(7)の下側の条件判定に判定基準幅を持たすと、次の式になる。

【0 0 7 5】

【数 8】

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } (S_{WT} = 0) \cap (|v_{d(k)} - V_{SH}| \leq |\Delta v|) \text{ then } (S_{WT} = 1) \\ \text{elseif } (S_{WT} = 1) \cap (|v_{d(k)} - V_{SL}| \leq |\Delta v|) \text{ then } (S_{WT} = 0) \end{array} \right\} \quad (8)$$

【 0 0 7 6 】

式 ( 8 ) は、 $V_{SH}$  が判定基準の上限、 $V_{SL}$  が判定基準の上限である。その他は式 ( 7 ) と同じである。同式の判定結果は、速度が判定基準の上限  $V_{SH}$  以下 ( 速度上昇 ) の時に上限値  $V_{SH}$  以上になると判定結果を  $S_{WT} = 1$  とし、速度が判定基準の下限  $V_{SL}$  以上 ( 速度下降 ) の時に下限値  $V_{SL}$  以下になると判定結果を  $S_{WT} = 0$  とする。

( 7 ) 不適切なモデル表現

次に非線形パラメータの好ましくないモデル化例について検討する。

【 0 0 7 7 】

図 1 0 は、図 8 で示す非線形損失特性  $C$  を機能モデルの状態量で直接非線形にするモデル化例である。このモデルの支配方程式は、次のようになる。

【 0 0 7 8 】

【 数 9 】

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= C v_d^2 \left( \frac{v_d}{|v_d|} \right) + f_2 \\ v_2 &= -v_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

【 0 0 7 9 】

図 1 0 の機能モデルは、状態量を直接操作する式 ( 9 ) となり一般性のない走行抵抗固有の非線形性を表す数学モデルとなり、線形の支配方程式で表現することは困難である。また、非線形性を固有の機能として数多く持つ製品や部品は、この物理現象の練成を直接数学モデルで解くことは不可能に近く、従来の非線形モデルの限界とも考えられる。

【 0 0 8 0 】

例えば、式 ( 1 ) ・式 ( 2 ) と式 ( 9 ) を比較すると、同一モデルでも式 ( 1 ) ・式 ( 2 ) は、非線形性の式と線形の式に分かれ、複数の線形式の各状態量を互いに代入して解くことができる。しかし、式 ( 9 ) の線形式と非線形式が混在した式からは、各非線形式の状態量を互いに代入して解くことは困難である。

【 0 0 8 1 】

このように非線形のモデル化には、同じ機能や挙動でも表現する方法が幾通りもあるが、線形モデルに非線形モデルを融合させるには、モデル化に際して制約を受けることが判る。その制約とは、機能モデルとその支配方程式は線形でモデル化し、これに組み込む非線形性は独立した機構モデルに分けてモデル化することが重要となる。この制約を満たさないモデル化には、以下のような問題が発生する。

【 0 0 8 2 】

①複数の非線形を持つ製品や部品を数学的に解くことが困難。

【 0 0 8 3 】

②支配方程式に線形理論が適用出来ない。

【 0 0 8 4 】

③非線形パラメータのモデルを入れ子方式で組み替られない。

【 0 0 8 5 】

④機能モデルと非線形パラメータのモデルが標準化できない。

以上のことから、図 1 0 ( a ) ・ ( b ) は、機能モデルとしては不適切なモデル化の例といえる。

【 0 0 8 6 】

ただし、図 1 0 ( a ) ・ ( b ) の表現法は、これ进行处理するソフトウェア上の配慮があれば、以下のような用法が可能である。

【 0 0 8 7 】

①複雑な系を簡素化し、全体を視覚的に理解する為の系統図や説明図用。

【 0 0 8 8 】

②開発現場で繰り返し使用する機能モデルを簡素化するための表現手段。

【 0 0 8 9 】

③非線形を含む機能モデルやパラメータをシンボル化するための記号。

( 8 ) 車両の走行抵抗モデル

次に図 9 で示す機能モデルは、図 8 の非線形損失特性  $C_v$  に動摩擦力  $F_T$  の構造非線形モデルを追加して走行抵抗の精度向上を図った例である。図 9 の非線形損

失特性 $C_v$ とタイヤの動摩擦力 $F_T$ は、車の走行性能や燃費などを決める上で重要な走行負荷である。これを更に詳細にすると次式で表すことができる。

【0 0 9 0】

【数 1 0】

$$f_T = \frac{1}{2} \rho C_d A v_d^2 + \mu_m W_m \cos(\theta) + W_m \sin(\theta) \quad (10)$$

【0 0 9 1】

式(10)は、 $\rho$ が空気密度、 $C_d$ が空気抵抗係数、 $A$ が前面投影面積、 $\mu_m$ がこがり抵抗係数、 $W_m$ が車両重量、 $\theta$ が傾斜角である。同式の前の項は走行風による力 $f_v$ 、中の項がタイヤの動摩擦力 $F_T$ 、後の項が重量による登降坂の力を表している。式(10)の前と中の項を式(3)に倣って速度 $v_d$ の絶対値で整理して、全体を等価非線形損失特性 $C_T$ として一つの機構モデルにまとめ、これに車の質量 $W_m/g$ を付加した機能・機構モデルは、図11となる。尚、同図の、 $v_d$ は車の速度、 $f_d$ は駆動力、 $f_T$ は走行抵抗力、 $x_m$ は内部状態量である。

【0 0 9 2】

図11は、下位に展開された階層化構造を包含関係で表した、等価非線形損失特性 $C_T$ の機構モデルである。このモデルには、走行風荷重 $f_v$ とタイヤ動摩擦力 $F_T$ の位差量を再現する機構モデルが下位に組み込まれ、この $f_v$ と $F_T$ を加算して上位に統合し式(10)に倣って変換した等価非線形損失特性 $C_T$ を $C$ に代入する機構モデルとなっている。図11の機構モデルは、上下左右に展開されて体系的にモデル化されていることが判る。

【0 0 9 3】

図11の機能モデルの支配方程式と結合条件式は、次式となる。

【0 0 9 4】

【数 1 1】

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ v_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{W_m}{g} & -C & 1 & -W_m \sin(\theta) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_m \\ x_m \\ f_d \\ 1 \end{bmatrix} \\ v_{i-} &= v_d \\ C &= C_v \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

【0 0 9 5】

図 1 1 の機構モデルは、次の数学モデルで表すことができる。

【0 0 9 6】

【数 1 2】

$$\left. \begin{aligned} v_{i-} &= x_m + \int_0^{t_{\text{imp}}} x'_m dt \\ v_{i-} &= v_{iv} = v_{iT} \\ f_v &= \frac{1}{2} \rho C_d A v_{iv}^2 \\ F_T &= \mu_m W_m \cos(\theta) S_{WT} \\ C_T &= (f_v + F_T) \frac{1}{|V_{i-}|} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

【0 0 9 7】

式 (1 2) は、1 行目が次期標本化時期の推定速度  $v_i$ 、2 行目が入力された推定速度  $v_i$  を下位機構モデルに分配する結合条件式、3 行目が走行風抵抗  $f_v$  を再現する式、4 行目がタイヤの動摩擦力  $F_T$  を再現する式、5 行目が等価非線形損失特性  $C_T$  である。同式の変数は、 $v_i$  が速度  $v_d$  の観測量、 $S_{WT}$  が式 (6) の上側の条件判定、 $v_{iv}$  が下位に展開された走行風抵抗の機構モデルに入力される速度、 $v_{iT}$  が下位に展開されたタイヤ摩擦抵抗の機構モデルに入力される速度



である。

【0098】

図11で示すように機構モデルは、スイッチ要素を含む構造非線形も含めて、1個の機構モデルにまとめることができる。これは、同一機能の非線形であれば、これを1つの系と見なして、全体から細部まで垂直展開して体系化できることを示している。

(事例説明)

#### 1. 空気ばねのモデル化例

流体系の例として、図12に示す自動車用エンジンの圧縮・膨張工程を模擬した空気圧シリンダのモデル化を行う。尚、圧縮・膨張に伴う内部エネルギー（温度エネルギー）のモデル化は省略する。

【0099】

図12は、 $p_0$ が大気圧・ $S$ がシリンダ断面積を表し、 $M$ がピストン質量、 $C$ が粘性抵抗係数、 $K$ が空気ばね剛性、 $D$ が内部減衰係数、 $f$ がピストン外力、 $v$ がピストン速度、 $P$ がシリンダー内圧、 $V$ がシリンダー容積である。同図は、ピストンには、外力 $f$ の作用して、ピストン速度 $v$ とこれに伴うシリンダ容積変化 $\Delta V_p$ が生じ、シリンダ内圧 $p$ を発生する。このシリンダ内圧 $p$ は、空気ばねの剛性 $K$ としてピストンの反力として作用する。また、この内圧上昇は、シリンダ内の温度上昇を招き熱膨張した体積増加成分が内圧上昇成分の一部となる。この温度上昇は、内部減衰係数 $D$ によって放熱されて、熱膨張した体積増加成分を減少させる働きをする。また、シリンダーの断熱と放熱は内部減衰係数 $D$ が行なう。尚、シリンダー容積の初期状態は、内圧 $p$ が大気圧 $p_0$ と等しい状態のシリンダ容積 $V_0$ とする。

#### (1) 機能モデル

この関係をまとめたピストンの圧縮・膨張工程は、図13で示す機能モデルとなる。シリンダーの断熱と放熱は、内部減衰係数 $D$ が行う。図13の機能モデル派、流動蓄積要素（基本機能要素）に空気バネの機構モデルが組み込まれたものである。尚、温度上昇の機構モデルは省略する。

【0100】

図 1 3 は、P がシリンダー内圧の観測量、 $V_{p-}$  の 2 重の積分記号がピストン移動距離  $x_{aa}$  のシリンダー容積（推定累積観測量）を求める。

【0 1 0 1】

図 1 3 の支配方程式・結合条件・推定観測量は、上から順に次式となる。

【0 1 0 2】

【数 1 3】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M & 0 & -C & -S & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K} & S & -\frac{1}{D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_a \\ x'_c \\ x_{aa} \\ x_a \\ x_c \\ f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta V_{i-} = \Delta V_{p-} \\ K = K_s \end{array} \right\}$$

【0 1 0 3】

式 (13) の上側は、1～2 行目が状態方程式、3 行目が蓄積観測量の状態方程式で  $x_{aa}$  がピストン移動距離（蓄積位差量）、4 行目が入出力方程式、5 行目がシリンダー圧力の観測量  $p$  の式を表す。下側は、機構モデルと接続する結合条件式で、 $K_s$  が機構モデル側の空気ばね剛性、同様に  $V_{i-}$  がピストン移動距離の体積である。

(2) 機構モデル（空気ばねモデル）

図 1 3 の機構モデルについてモデル化すると、以下のようなになる。

【0 1 0 4】

まず、同図のピストンの移動量で決まるシリンダー容積  $V$  は、次のようになる。

【0 1 0 5】

【数 1 4】

$$\left. \begin{aligned} V_{p-} &= \left( Sx_{aa} - \frac{1}{D}x_c \right) t_{smp} \\ V &= V_U - (Sx_{aa} + \Delta V_{p-}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

【0 1 0 6】

式 (14) は、上側が容積変化の推定蓄積観測量、下側がシリンダーの体積の推定観測量である。尚、 $t_{smp}$  は標本化周期である。

【0 1 0 7】

次に、圧縮前の状態から圧縮された状態の圧力  $p$  と容積  $V$  の関係をポリトロープ変化として表すと次式となる。式中の  $n$  は、指数である。

【0 1 0 8】

【数 1 5】

$$p = p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^n \quad (15)$$

【0 1 0 9】

式中のポリトロープ変化を決める指数  $n$  は、以下の値にすることで空気バネ剛性  $K_s$  が多様に変換する。

【0 1 1 0】

- $n = 0$  : 等圧変化
- $1$  : 等温変化
- $\kappa$  : 断熱変化 ( $\kappa$  は比熱比)
- $\infty$  : 等容変化

式 (15) を変換した非線形パラメータは、次式のようにになる。

【0 1 1 1】

【数 1 6】

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_c &= x_c' = K_s \Delta V_{p-} \\ K_s &= p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^n \frac{1}{\Delta V_{P-}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

【0 1 1 2】

式 (16) は、上側がシリンダ圧力変動  $\Delta p$  と容積変化  $\Delta V_{p-}$  の関係を空気ばね剛性  $K_s$  で表わした線形式である。下側が式 (15) から容積  $V$  における空気ばね剛性  $K_s$  の非線形式である。この両式によってモデルは、線形と非線形に分離して互いが独立した関係となる。

【0 1 1 3】

空気ばね剛性  $K_s$  は式 (16) を体積変化で微分して求めることができる。数値計算としては、同式を直接使用する方法、テーラー展開する方法などがあり、前者は  $P_0$  と  $P$  間の圧力変化が少ないときの便法で、後者は変動が大きいときの近似式に適する。前者について、現在を  $(k)$  と時期標本化時期を  $(k+1)$  とする離散化式で表すと、式 (16) は次のようになる。

【0 1 1 4】

【数 1 7】

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{(k+1)} &= K_{S(k+1)} \Delta V_{P(k+1)-} \\ K_{S(k+1)} &= p_0 \left( \frac{V_0}{V_{(k+1)}} \right)^n \frac{1}{|\Delta V_{P(k+1)-}|} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

【0 1 1 5】

式 (17) は、 $V_{(k+1)}$  が推定容積、 $\Delta V_{P(k+1)-}$  が容積変化である。同式をテーラー展開した式は、次のようになる。

【0 1 1 6】

【数 1 8】

$$K_S = P_0 V_0^n \left\{ (n+0) \left[ \frac{V_{P(k+1)}^0}{1! W_{(k+1)}^{n+1}} + (n+1) \left\{ \frac{V_{P(k+1)}^1}{2! W_{(k+1)}^{n+2}} + \dots + (n+j) \left\{ \frac{V_{P(k+1)}^{j-1}}{(j+1)! W_{(k+1)}^{n+j+1}} + \dots \right\} \right\} \right] \right\}$$

(18)

【0117】

ここで、 $j$  は展開の次数で  $0 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots$  とする。

(3) シミュレーション結果

図13の機能モデルを表1の各特性値で行ったシミュレーション結果を、図14と図15に示す。尚、空気ばね剛性  $K_s$  は、式(18)を適用した。

【0118】

【表1】

空気圧シリンダーの特性値

特性名	記号	単位	特性値
質量	$M$	[kg]	100.0
粘性抵抗係数	$C$	[N/(m/s)]	1000.0
内部減衰係数	$D$	[N/(m/s)]	$3 \times 10^9$
空気の比熱比	$K$		1.4
断面積	$S$	[m <sup>2</sup> ]	0.01
シリンダ容積	$V_0$	[m <sup>3</sup> ]	0.001
大気圧	$p_0$	[Pa]	$0.1 \times 10^6$

【0119】

図14は各状態量の時刻歴変化を示し、図15はシリンダー容積  $V$  に対する圧力  $p$  と速度  $v$  の関係を表す  $P-V$  線図と  $v-V$  線図である。両式は、実線が内部減衰係数を  $D=0$  とした断熱状態、点線が  $D=3 \times 10^9$  [N/(m/sec)] とした放熱状態である。シミュレーションは、3000 [N] の外力  $f$  をステップ状に与えた結果で、非線形な減衰振動が収束する過程について行った。図14は、一番上側がシリンダーの内圧  $p$  [Pa]、次がピストン速度  $v$  [m/sec]、一番下がシリンダー容積  $V$  [m<sup>3</sup>] の応答特性を表す。各特性に共通して、空気ばね剛性  $K$  [Pa/m<sup>3</sup>] の非線形性により減衰振動波形に歪みがあることが判る。また、放熱状態では、シリンダー容積  $V$  [m<sup>3</sup>] から熱収縮による体質変化が現れている。

【0120】

図15の上側は、シリンダ容積  $V$  [m<sup>3</sup>] とピストン速度  $v$  [m/sec] の収束過程の関係を表し、渦巻き状に収束した中心が定常状態である。下側は、シ

リンダ容積  $V$  [ $\text{m}^3$ ] とシリンダー内圧  $p$  [ $p_a$ ] の関係を表わし、空気のバネ剛性  $K$  が非線形特性であることを表す。また、放熱状態では、圧力に関係無く熱収縮による体積化を起こすことが判る。

【0121】

## 2. がた・底突きのモデル化例

図16に模式的ながたの構造モデルを示す。同図は、外筒Bの中に $\pm L_0$ の範囲を持つ可動体Aが組み込まれた例である。そして、可動体Aには速度  $v_1$  と力  $f_1$  によるエネルギーが加わり、同様に外筒Bも  $v_2$  と  $f_2$  が加わっている。尚、図中の  $y$  は外筒Bの中心を0とする可動体Aの相対位置である。

【0122】

図16の構造モデルは、可動体Aが $\pm L_0$ の範囲では可動体Aと外筒Bは互いに独立して動き、これを超えると両者は一体となり剛体として動く。従って、がた（底突き）は、両者を一体にした剛性による接続と開放が基本機能と考えられる。この関係を整理してモデル化すると、図17の機能モデルとなる。

### (1) 機能モデル

図17は、 $K_g$ が接触した時の剛性、 $C_g$ が粘性抵抗係数、 $v_1$ が可動体Aと外筒Bの速度差、 $x$ が内部状態量である。同図(a)は機構モデルから非線形な剛性を代入する方法でモデル化し、(b)はスイッチ要素を組み込み $K_g$ が接続・開放される構造非線形としてモデル化されている。がたはこのように機構モデルと構造非線形のどちらの方法でもモデル化が可能である。しかし、がたの基本機能は、外筒Aと可動体Bの剛性を接続・開放することから、(b)の構造非線形によるモデル化の方が望ましい。なぜなら、(a)の機構モデルで表わした場合は、機能モデルと支配方程式にスイッチ要素が組み込まれないので、構造的に非線形であることを識別することが困難である。

【0123】

まず、図17(a)の機能モデルは、以下の支配方程式となる。

【0124】

【数 1 9】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_g} & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -C_g & C_g \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

【0 1 2 5】

次に、図 1 7 (b) の機能モデルは、次の支配方程式と結合条件式になる。

【0 1 2 6】

【数 2 0】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_g S_{wy}} & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 1 & C_g & -C_g \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

【0 1 2 7】

【数 2 1】

$$\left. \begin{array}{l} v_d = v_i \\ S_{WK} = S_{wy} \end{array} \right\} \quad (21)$$

【0 1 2 8】

(2) 機構モデル (間隙モデル)

図 1 7 (a) の中にある機構モデルは、次式で表すことができる。

【0 1 2 9】



【数 2 2】

$$\left. \begin{array}{l} y = \int v_d dt \\ L_m = y - L_0 \\ \text{if } (|L_m| \geq 0) \text{ then } (K_g = K_{g0}) \text{ else } (K_g = 0) \end{array} \right\} \quad (22)$$

【0 1 3 0】

式 (2 2) は、1 行目が稼動体 A の相対距離  $y$ 、2 行目が外筒 B の壁と可動体 A の距離  $L_m$ 、3 行目が接続と開放の剛性値  $K_g$  である。

【0 1 3 1】

図 1 7 (b) の機構モデルは、次式で表すことができる。

【0 1 3 2】

【数 2 3】

$$\left. \begin{array}{l} y = \int v_d dt \\ L_m = y - L_0 \\ \text{if } (|L_m| \geq 0) \text{ then } (S_{wY} = 1) \text{ else } (S_{wY} = 0) \end{array} \right\} \quad (23)$$

【0 1 3 3】

式 (2 3) は、1 ~ 2 行目は式 (2 2) と同じ、3 行目は外筒 B と可動体 A の接触を判定する条件判定式である。この条件判定は、接触状態を  $S_{wY} = 1$  とし、非接触状態を  $S_{wY} = 0$  とする。そして、この条件判定  $S_{wY}$  によるスイッチ要素  $S_{wY}$  の操作で剛性  $K_g$  を接続・開放する。

(3) シミュレーション結果

一つの事例として、図 1 8 で示す液体を封入したシリンダーと小穴を設けたピストンの粘性抵抗係数  $C_g$  による衝撃吸収用ダンパーの底突きについて検討する。この図 1 8 は、 $M_a$  がピストン質量・ $C_a$  が粘性抵抗係数・ $M_b$  がシリンダー質

量・ $C_b$ が粘性抵抗係数である。また外部とは、ピストンとシリンダーに操作力 $f_a$ と $f_b$ が作用し、速度 $v_a$ と $v_b$ が出力さる。その他については、図 1 8 で示す機能モデルと同じである。

【0 1 3 4】

図 1 8 で示す構造モデルのモデル化は、図 1 7 (b) の機能モデルに同図の $M_a \cdot C_a \cdot M_b \cdot C_b$ を付加機能として追加することで実現できる。従って、衝撃吸収用ダンパーは図 1 7 (b) の機能モデルに、これらの附加機能を追加した図 1 9 の機能モデルとなる。尚、図中の各 $x$ は内部状態量である。

【0 1 3 5】

図 1 9 の両側に付加機能を追加する結合条件は、それぞれ次式となる。

【0 1 3 6】

【数 2 4】

$$\left. \begin{array}{l} v_{ao} = v_1 \\ f_1 = f_{ai} \end{array} \right\} \quad (24)$$

【0 1 3 7】

【数 2 5】

$$\left. \begin{array}{l} v_{bo} = v_2 \\ f_2 = f_{bi} \end{array} \right\} \quad (25)$$

【0 1 3 8】

式 (2 4) と式 (2 5) にピストン・がたの機能モデル・シリンダーを統合すると、次式となる。

【0 1 3 9】

【数 2 6】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_a \\ v_b \\ f_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_a & 0 & 0 & -(C_g + C_a) & -1 & C_g & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_g S_{wy}} & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_b & C_g & 1 & C_g - C_b & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_g & -1 & C_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_a \\ x' \\ x'_b \\ x_a \\ x \\ x_b \\ f_a \\ f_b \end{bmatrix} \quad (26)$$

【0 1 4 0】

図 1 9 の底突きダンパーの機能・機構モデルを表 2 で示す各特性値でシミュレーションをおこなった、その結果を図 2 0 に示す。

【0 1 4 1】

【表 2】

衝撃吸収用ダンパーの特性値

特性名	記号	単位	特性値
ピストン			
質量	$M_a$	[Kg]	0.2
粘性抵抗係数	$C_a$	[N/(m/sec)]	0.5
シリンダー			
可動質量	$M_b$	[Kg]	2.0
粘性抵抗係数	$C_b$	[N/(m/sec)]	10.0
がた特性			
底突き剛性	$K_g$	[N/m]	$1.0 \times 10^6$
粘性抵抗係数	$C_g$	[N/(m/sec)]	15.0
がた幅	$L_0$	[m]	0.001

【0 1 4 2】

図 2 0 のシミュレーション結果の速度  $v_a$  は、速度  $v_b$  と対比させるために正負

を反転して表してある。また、図 2 0 のシミュレーションは、操作力を与えたピストンの動きに従ってシリンダーが従動する状態を再現したものである。操作としては、ピストンの操作力  $f_a$  に 1 [N] を加え、0. 1 5 [s e c] 後に逆方向の捜査力 - 1 [N] を加え、0. 3 [s e c] 後に操作力を 0 にして終了した。この際、シリンダー側の操作力  $f_b$  [N] は与えていない。シミュレーション結果は、同図の上から順に、ピストンに加えた操作力  $f_a$  [N]、ピストン速度  $v_a$  [m / s e c] とシリンダー速度  $v_b$  [m / s e c]、ピストンとシリンダー間に作用する力  $f_1 \cdot f_2$  [N]、シリンダーにおけるピストンの相対位置  $y$  [m] である。尚、上から 2 番目の速度は、実線が駆動側のピストン速度  $v_a$  で、点線が従動側のシリンダー速度  $v_b$  を表している。

【 0 1 4 3 】

図 2 0 において、ピストンとシリンダーの速度  $v_a \cdot v_b$  から、両者は約 0. 0 3 [s e c] で接触して底突きを繰り返しながら収束して、約 0. 0 8 [s e c] 後に一体となる。接触の瞬間には、衝突の衝撃によって反発力が発生し、両者は接触と離反を繰り返しながら収束することが判る。このことは、両者間に作用する力  $f_1$  の衝撃荷重と相対位置  $y$  の変動からも判る。次に、操作力  $f_a$  を反転するとピストンは、シリンダーの反対側の壁に接触して同様の結果を示している。また、最後に操作力  $f_a$  を除くとピストンがシリンダーが一体となって停止する。

### 3. ゼネバ機構

#### (1) 基本機能

揺動リンク機構を応用した機械要素の一つに、送り装置などの間欠動作を行うゼネバ機構がある。ゼネバ機構は主部と従部からなり、主部は揺動リンク機構の回転節が対応し、従部には揺動節に対応して円周側に開いた溝があり、主部の連結軸が従部の溝と勘合して、主部の回転により従部が停止と回転運動を間欠的に行う。このゼネバ機構を、図 2 1 に示す。

【 0 1 4 4 】

図 2 1 のゼネバ機構は、主部と従部にトルク  $T_p \cdot T_s$  と角速度  $\omega_p \cdot \omega_s$  が与えられ、慣性モーメント  $J_p \cdot J_s$  と粘性抵抗係数  $C_p \cdot C_s$  を持っている。また、同

図の  $L_z$  は節間の距離、 $R_p$  は連結軸の回転半径である。主部に回転トルク入力  $T_p$  を与えると、従部連結溝の連結角  $-\alpha$  の位置に主部連結軸の回転角度  $\beta_w$  がきたとき、両者は噛み合い従部を駆動する。そして、従部が連結角  $2\alpha$  まで回転すると連結が外れて従部は停止する。この停止状態では、従部の半円形の切欠きと主部の円弧形状が噛み合い、従部は回転できない構造になっている。尚、主部の 1 回転に対する従部の間欠動作数は、従部に設けられた連結溝数  $N$  によって決まる。

## (2) 機能モデル (ゼネバモデル)

図 2 1 の構造をモデル化した機能・機構モデルを図 2 2 に示す。同図の  $T_p$  と  $\omega_p$  が主部の駆動トルクと回転角速度で、 $T_s$  と  $\omega_s$  が従部の駆動トルクと回転角速度、 $\theta_s$  の観測量は従部の回転角である。図 2 2 の機能モデルは、主部に慣性モーメント  $J_p$ ・粘性抵抗係数  $C_p$  を持ち、従部にも慣性モーメント  $J_s$ ・粘性抵抗係数  $C_s$  を持っている。この主部の角速度  $\omega_p$  は、伝達係数  $\phi$  を介して非線形剛性  $K$  に加えられ、トルクに変換して従部に伝えられる。また、このトルクは伝達係数  $\phi$  を介して主部に負荷トルクとして返される。図 2 2 の機能モデルの支配方程式は、次のようになる。尚、図中の  $x$  は内部状態量を示す。

【0 1 4 5】

【数 2 7】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_p \\ \omega_s \\ \theta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_p & 0 & 0 & 0 & -C_p & -\Phi S_w & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K} & 0 & 0 & \Phi S_w & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_s & 0 & 0 & 1 & -C_s & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ x'_K \\ x'_s \\ x'_\theta \\ x_p \\ x_K \\ x_s \\ x_\theta \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix}$$

(2 7)

【0 1 4 6】

図 2 2 の機構モデルは、構造非線形なので主部の回転角  $\beta_w$  を推定観測量とし

て求め、慣性モーメント  $J_p$  の出力位差量に包含させる。回転角  $\beta_w$  は、次式となる。

【0 1 4 7】

【数 2 8】

$$\beta_w = \int x_p dt \quad (28)$$

【0 1 4 8】

機能モデルに機構モデルを入れ子にする結合条件式は、次のようになる。

【0 1 4 9】

【数 2 9】

$$\left. \begin{aligned} \beta_w &= \theta_B \\ \Phi_z &= \Phi \\ K_z &= K \\ S_{ws} &= S_w \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

【0 1 5 0】

### (3) 機構モデル (間歇運動モデル)

図 2 2 に組み込まれている機構モデルには、主部の回転角  $\beta_w$  を決めて従部との連結を判定する結合条件  $S_{ws}$  の機能、連結した時の連結剛性  $K_z$  を決める機能、主部と従部間の伝達係数  $\phi_z$  を決める機能が包含されている。これらの各下位機構モデルは、次の結合条件式で水平展開される。

【0 1 5 1】

【数 3 0】

$$\beta = \beta_z = \beta_\phi \quad (30)$$

【0152】

(a) 機構モデル (連結判定モデル)

式(29)の結合条件式から、式(28)の推定回転角 $\beta_w$ は、機構モデルに推定回転角 $\theta_{B-}$ として入力される。この推定回転角 $\theta_{B-}$ は、従部の回転角度として $0 \sim 2\pi$ の角度範囲に変換できる。そして、この回転角 $\beta$ は、式(30)によって各機構モデルに入力される。

【0153】

【数31】

$$\beta = 2\pi \left\lfloor \frac{|\theta_{B-}|}{2\pi} - \text{int} \left( \frac{|\theta_{B-}|}{2\pi} + 0.5 \right) \right\rfloor \quad (31)$$

【0154】

式(31)の中の $\text{int}(a)$ は、 $a$ の値の小数部を切り捨てて整数部を取り出す関数である。図21の構造モデルにおいて、主部の回転に対する従部の連結を連結角 $\alpha$ は、主部の連結軸に対する従部の連結溝数 $N$ によって決まる、式は次のようになる。

【0155】

【数32】

$$\alpha = \frac{\pi}{N} \quad (32)$$

【0156】

式(32)の従部の連結角 $\alpha$ に対する主部の連結角 $\alpha_p$ は、図21の幾何学的構造から次式を導くことができる。

【0157】



【数 3 3】

$$\alpha_p = \cos^{-1} \left\{ \frac{L_z}{R_p} \left( \sin^2(\alpha) + \sqrt{\left( \frac{R_p}{L_z} \cos(\alpha) \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right)^2} \right) \right\} \quad (33)$$

【0 1 5 8】

式 (33) 連結角  $\pm \alpha_p$  の範囲内に主部の回転角  $\beta$  がある時、主部と従部は、連結される。従って連結状態を判定する条件判定  $S_{ws}$  は、次式となる。

【0 1 5 9】

【数 3 4】

$$\text{if } (\beta > \alpha_p) \text{ then } (S_{ws} = 0) \text{ else } (S_{ws} = 1) \quad (34)$$

【0 1 6 0】

式 (34) は、 $S_{ws} = 1$  が連結状態・ $S_{ws} = 0$  が非連結状態である。

(b) 機構モデル (伝達係数モデル)

次に連結状態における主部と従部間の伝達係数  $\phi_z$  は、揺動機構と同じリンク機構の式となり、主部と従部の軸間距離  $L_z$ ・主部の連結軸の回転半径  $R_p$  と主部の回転角  $\beta$  から求まる。数学モデルは、次のようになる。

【0 1 6 1】

【数 3 5】

$$\Phi_z = \frac{R_p^2 - R_p L_z \cos(\beta_\phi)}{R_p^2 + L_z^2 - 2 R_p L_z \cos(\beta_\phi)} \quad (35)$$

【0 1 6 2】

式 (3 5) の伝達係数  $\phi_z$  は、非連結時に図 2 2 で示すスイッチ変数  $S_w$  が 0 になって主部と従部を切り離す。

(c) 機構モデル (伝達剛性モデル)

最後に主部と従部間の非線形剛性  $K$  は、主部の剛性・従部の剛性・接触の剛性を合わせたものである。連結時の非線形剛性  $K$  は、主部の連結軸と従部の連結溝を介した剛性となり、主部の回転角  $\beta_w$  の関数で表せる。また非連結時には従部の連結溝の先端と主部の円弧形状と接触点の剛性になる。剛性が高いときは、定数として扱える。

(4) シミュレーション結果

図 2 2 の機能・機構モデルに表 3 の特性を使ってシミュレーションした結果を、図 2 3 と図 2 4 に示す。

【 0 1 6 3 】

【表 3】

主部	特性名	記号	単位	特性値
	慣性モーメント	$J_p$	$[\text{Kg m}^2]$	1.0
	粘性抵抗係数	$C_p$	$[\text{Nm sec/rad}]$	0.1
	回転半径	$R_p$	$[\text{m}]$	0.566
従部	慣性モーメント	$J_s$	$[\text{Kg m}^2]$	0.2
	粘性抵抗係数	$C_s$	$[\text{Nm sec/rad}]$	5.0
	連結溝数	$N$		4.0
連結	連結時の伝達剛性	$K_z$	$[\text{rad/Nm}]$	$1.0 \times 10^4$
	軸間距離	$L_z$	$[\text{m}]$	0.8

【0 1 6 4】

図 2 3 は時刻暦で表わした結果を示し、図 2 4 は横軸を主部の回転角  $\beta_w$  で表

してある。図23は、上から順に $\omega_p \cdot \omega_s$  [red/sec] が主部と従部の角速度、 $x_K$  [Nm] が非線形剛性 $K$ のトルク、 $S_w$ が条件判定である。また、図24は、横軸を主部の回転角 $\beta_w$  [rad] で表し、縦軸は上側の $\omega_p \cdot \omega_s$  [red/sec] が図23と同じ角速度を示し、下側の $\theta_s$  [rad] が従部の回転角を示している。そして、シミュレーションは、主部の駆動トルク $T_p$ に2.7 [Nm] をステップ状に加え従部には負荷トルク $T_s$ を加えない場合の結果である。

## 【0165】

図23において、スイッチ変数 $S_w$ が1で連結したときは主部が従部を駆動し主部の角速度 $\omega_p$ は従部が負荷となって落ち込みが激しくなる。この時、従部の角速度 $\omega_s$ は急激に立ち上がるが、主部の落ち込みにより従部の角速度 $\omega_s$ も落ち込み、非線形剛性 $K$ のトルク $x_K$ は連結の衝撃でわずかに振動を発生している。また、連結終了時の条件判定 $S_w = 0$ で従部は停止しするが、停止の衝撃でトルク $x_K$ に少し振動が発生している。

## 【0166】

図24は、従部の回転角 $\theta_s$ は主部の1回転( $2\pi$ )毎に $\pi/2$ 単位で間欠的に動作し、非連結の時は回転角を維持していることが判る。

## 4. 摩擦のモデル化例

非線形な側負荷の代表的な例に摩擦がある。質量 $M$ に摩擦力 $F_v$ が作用する摩擦の機構モデルを図25で示す。図25は、外力 $f_1 \cdot f_2$ が摩擦力 $F_v$ を受けながら面上を速度 $v_1 \cdot v_2$ で移動する質量 $M$ の構造モデルを示す。この摩擦力 $F_v$ は、定数となる静摩擦力 $F_s$ と速度の関数となる動摩擦力 $F_M$ から成り立つものとする。

## (1) 機能モデル

図26は、位差蓄積要素の質量 $M$ に摩擦力を発生する側負荷 $F_v$ を加えた機能モデルとして表されている。そして、この側負荷 $F_v$ には、摩擦力を生成する機構モデルが組み込まれている。図26の機構モデルは、質量 $M$ の速度(内部状態量 $x$ )と加速力 $f_a$ の推定観測量から生成した摩擦力 $F_f$ を生成する。また、出力速度 $v_2$ 側には、坑力 $f_2$ を発生する抵抗係数 $C$ を負荷として追加している。

【0167】

図26から求めた機能モデルの支配方程式と結合条件式は、次のようになる。

【0168】

【数36】

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ v_1 \\ f_2 \\ f_{a-} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -M & -C & 1 & -F_v \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & -C & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ x \\ f_1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ v &= x \\ f &= f_{1-} + f_{2-} \\ F_f &= F_v \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

【0169】

式(36)は上から順に、1行目が支配方程式、2行目が入出力方程式、3～4行目が抵抗係数の坑力 $f_2$ と加速力 $f_{a-}$ の推定観測方程式である。同式下側の結合条件式は、1行目が速度の観測量、2行目が質量に加わる推定加速力、3行目が摩擦力である。

【0170】

図26の機構モデルは、下側が静摩擦力 $F_s$ を生成するモデル、上側中央が動摩擦力 $F_M$ を生成するモデル、左端が静摩擦力 $F_s$ と動摩擦力 $F_M$ を切替えて代入量 $F_f$ を出力するモデルである。また、右端には、速度に依存する動摩擦力 $F_M$ の特性がグラフ表現で組み込まれている。尚、動摩擦力 $F_M$ が速度 $v$ に無関係に一定値となる場合は、グラフは不用となる。

(2) 機構モデル(摩擦モデル)

静摩擦力 $F_s$ と動摩擦力 $F_M$ の切り替えは、速度 $v$ の判定条件 $S_{wv}$ によって切り替える。切り替えは、 $S_{wv}=0$ を停止状態として静摩擦力 $F_s$ を選択し、 $S_{wv}=1$ を移動状態として動摩擦力 $F_M$ を選択する。機構モデルは、次式となる。

【0171】

【数 3 7】

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } (v_s = 0) \text{ then } (S_{wv} = 0) \text{ else } (S_{wv} = 1) \\ F_i = F_{Mi} S_{wv\_1} + F_{Si} S_{wv\_0} \end{array} \right\} \quad (37)$$

【0 1 7 2】

式(37) 2行目は、 $F_{Mi}$ が動摩擦力、 $F_M$ と $F_{Si}$ が静摩擦力、 $F_s$ と $v_s$ が速度 $v$ である。また、スイッチ変数の添え字0と1は、切替スイッチのNOスイッチ側とNCスイッチ側を示す。式(37)の上側の判定条件式を零速度に収束させる判定法で表すと次のようになる。

【0 1 7 3】

【数 3 8】

$$\text{if } (|v_{S(k)}| < |v_{S(k)} - v_{S(k-1)}|) \text{ then } (S_{wv} = 0) \text{ else } (S_{wv} = 1) \quad (38)$$

【0 1 7 4】

式(38)は、 $v_{S(k)}$ が現在の速度、 $v_{S(k-1)}$ が標本化周期1つ前の速度、 $\Delta v$ がこれから求めた速度変化幅である。条件判定 $S_{wv}$ の判定結果は、式(37)と同じである。

【0 1 7 5】

次に、静摩擦力 $F_s$ を生成する数学モデルを導く。静摩擦力 $F_s$ には、2つの振る舞いがあり、一つは加速力 $f_s$ が静摩擦力 $F_s$ 以下の時には、静摩擦力 $F_s$ に釣り合った静摩擦力 $F_s$ を反力として質量 $M$ に与えて停止状態にしておくこと。今一つは静摩擦力 $F_s$ 以上の加速力 $f_s$ が加えられた瞬間、動摩擦力 $F_M$ に切替え質量 $M$ を起動させることである。この瞬間は、質量 $M$ が停止状態なので動摩擦力 $F_M$ の方向(符号)は加速力 $f_s$ と同一方向(符号)とし、質量 $M$ へは側負荷 $F_v$ を負の値にして反力にする。この両者の切り替えは、加速力 $f_s$ と側負荷 $F_{s0}$ の差 $Y_f = |f_s| - F_{s0}$ の条件判定 $S_{wy}$ で操作する。切り替えは、停止の釣り合い状

態を  $S_{WY} = 0$  として加速力  $f_s$  側を選択し、動く瞬間を  $S_{WY} = 1$  として静摩擦力の側負荷  $F_{S0}$  側を選択する。この機構モデルは、次式となる。

【0 1 7 6】

【数 3 9】

$$\left. \begin{aligned} & \text{if } \{|f_s| - F_{S0}\} > 0 \text{ then } (S_{WY} = 1) \text{ else } (S_{WY} = 0) \\ & F_S = f_s S_{WV\_0} + F_{S0} S_{WV\_1} \left( \frac{f_s}{|f_s|} \right) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

【0 1 7 7】

式 (3 9) 2 行目の加速力  $f_s$  を  $|f_s|$  で除算しているのは、摩擦の方向 (符号) を決める。最後に動摩擦  $F_M$  を生成する機構モデルについてモデル化する。動摩擦力  $F_M$  は、動摩擦力の側負荷  $F_{M0}$  に速度  $v_v$  の符号を加えて生成する。この機構モデルは、次のような式になる。

【0 1 7 8】

【数 4 0】

$$F_M = F_{M0} \left( \frac{v_v}{|v_v|} \right) \quad (40)$$

【0 1 7 9】

式 (3 9) の静摩擦力  $F_{S0}$  と式 (4 0) の動摩擦力  $F_{M0}$  は、速度  $v$  によるグラフ検索で求めるソフトウェアまたは数学モデルを必要とする。

【0 1 8 0】

以上の各機構モデルは、次の結合条件式で結合する。

【0 1 8 1】

【数 4 1】

$$\left. \begin{aligned} v &= v_s = v_v = v_f \\ F_M &= F_{Mi} \\ F_S &= F_{Si} \\ F_{S0} &= F_{M0} = F_g \\ f &= f_s \\ F_f &= F_F \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

【0 1 8 2】

(3) シミュレーション結果

図 2 6 の機能モデルを表 4 で示す各特性値で行ったシミュレーション結果を図 2 7 に示す。尚、速度  $v = 0$  の判定は式 (3 8) で行い、動摩擦力  $F_{M0}$  は一定値とした。

【0 1 8 3】

【表 4】

摩擦の特性値

特性名	記号	単位	特性値
質量	$M$	[kg]	0.1
抵抗係数	$C$	[N/(m/s)]	0.5
静摩擦力	$F_{S0}$	[N]	0.5
動摩擦力	$F_{M0}$	[N]	0.1

【0 1 8 4】

シミュレーションは、単位時間当たり 0.5 [N/sec] で上昇する外力  $f$  を 1 [N] まで与え、4 [sec] からは同じ変化率で逆に -1 [N] までの外力を与えて、10 [sec] で外力を除いた。図 2 7 は、一番上が外力  $f_1$  [N]、2 番目が速度  $v_1$ 、3 番目が側負荷で与えた摩擦力  $F_v$  [N]、4 番目が抵抗



係数  $C$  の坑力  $f_2$  である。尚、摩擦力  $F_v$  と坑力  $f_2$  は、観測量である。

【0185】

図 27 において、外力  $f_1$  をゆっくり加えると静摩擦力  $F_v$  が発生して外力  $f_1$  を打ち消し質量  $M$  が動かない。1 [sec] の点から、外力  $f_1$  が摩擦力  $F_v$  を上回り質量  $M$  が動き始め一定の動摩擦力  $F_v$  が発生して定常状態に達する。4 [sec] の点からは外力  $f_1$  をゆっくり低下させ、6 [sec] 前後で再び静摩擦力  $F_v$  が発生し一旦質量  $M$  は停止する。更に、逆方向に外力  $f_1$  を加えると、質量  $M$  は逆方向に動き始め動摩擦力  $F_v$  が発生する。最後に、外力  $f_1$  を除くと、質量  $M$  は速度  $v_1$  を低下させて停止する。停止の際は、質量  $M$  の慣性力による速度が抵抗係数  $C$  を介して坑力  $f_2$  として現われ、これに対する静摩擦力  $F_v$  が発生し、しばらくして停止する。停止後は、摩擦力  $F_v$  が無くなる。

#### 5. 温度上昇のモデル化例

ここでは、比較的ゆっくりした過渡的な変化を非線形として再現するモデル化を試みる。

##### (1) 正規化 1 次応答モデル

時間経過により変化する特性の多くは、1 次又は 2 次の応答特性として表すことが多い。そこで、1 次と 2 次の応答遅れを 0～1 の範囲に正規化した、無単位の係数と考えた離散化式を用いる。1 次応答の一般式は、次のようになる。

【0186】

【数 42】

$$\left. \begin{aligned} z_{1(k+1)} &= p_1 z_{(k)} + q_1 u_{1(k)} \\ y_{(k)} &= c_1 z_{(k)} + d_1 u_1 \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

【0187】

【数 4 3】

$$P_1 = \exp\left(-\frac{t_{\text{smp}}}{\tau_1}\right) \quad (43)$$

【0 1 8 8】

式 (4 2) の  $P_1$  は離散化した 1 次遅れの固有値で、0 ～ 1 の範囲で収束し、1 以上で発散する。また、 $\tau_1$  は系の時定数、 $t_{\text{smp}}$  は離散化の標本化周期、 $k$  の添えは標本化時期を示す。

【0 1 8 9】

式 (4 2) において、 $z_{1(k+1)}$  と  $z_{1(k)}$  は内部状態量、 $u_{1(k)}$  と  $y_{1(k)}$  は入出力状態量、 $q_1$  は入力状態量の係数、 $c_1$  は出力状態量の係数である。同式の定常状態は、 $z_{1(k+1)} = z_{1(k)} = u_{1(k)}$  となり、入出力状態量間には差が発生しない。従って、式 (4 2) 上側の状態方程式は、入力状態量の係数  $q_1$  を次式にすることで正規化できる。

【0 1 9 0】

【数 4 4】

$$q_1 = (1 - P_1) \quad (44)$$

【0 1 9 1】

式 (4 2) の  $q_1$  に式 (4 4) を代入し、出力方程式の各係数を  $c_1 = 1 \cdot d_1 = 0$  にして出力方程式を省略した、次の標本化周期の一次応答（正規化）は、次のようになる。

【0 1 9 2】

【数 4 5】

$$z_{1(k+1)} = P_1 z_{1(k)} + (1 - P_1) u_1 \quad (45)$$

【0 1 9 3】

## (2) 正規化 2 次応答モデル

同様に 2 次応答も 2 個の 1 次応答の干渉として整理すると、次式のようなになる。  
尚、途中の整理過程は省略し結果のみ示す。

【0 1 9 4】

【数 4 6】

$$\left. \begin{aligned} z_{a(k+1)} &= p_a z_{a(k)} + (1 - p_a)(1 - g_{ab}) \mu_{1(k)} \\ z_{b(k+1)} &= p_b z_{b(k)} + (1 - p_b)(1 + g_{ab}) \mu_{1(k)} \\ y_{2(k)} &= (z_{a(k)} + z_{b(k)}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

【0 1 9 5】

ここで、 $p_a$  と  $p_b$  は式 (4 3) に対応した固有値、 $g_{ab}$  は 2 個の 1 次応答間の干渉度合いを表す係数で、以下の式で表すことが出来る。

【0 1 9 6】

【数 4 7】

$$\left. \begin{aligned} p_a &= \exp\{-t_{\text{smp}} / \tau_a\} \\ p_b &= \exp\{-t_{\text{smp}} / \tau_b\} \\ g_{ab} &= (\tau_a + \tau_b) / (\tau_a - \tau_b) \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

【0 1 9 7】

式 (5 5) は、 $\tau_a$  と  $\tau_b$  が時定数、 $t_{\text{smp}}$  が標本化周期である。

## (3) 温度上昇モデル

例として、モータの巻線抵抗の温度依存性についてモデル化する。モータなどに電力を加えれば、巻線抵抗の消費電力  $P_M$  による自己加熱が主因で、温度が上昇する。この温度上昇  $T_U$  は、モータの熱放散係数を  $\delta_M$  とすると次式で表すことができる。

【0 1 9 8】

【数 4 8】

$$T_U = \frac{1}{\delta_M} P_M \quad (48)$$

【0 1 9 9】

式(48)から温度上昇 $T_U$ は、巻線抵抗の消費電力 $P_M$ によって決まり、温度が上昇して電流が減少すると消費電力の低下を招く。その結果、機械的な出力が減少する。モータ電流 $I_M$ ・巻線抵抗 $R_M$ とすると、その消費電力 $P_M$ は次式で表すことができる。

【0 2 0 0】

【数 4 9】

$$P_M = R_M I_M^2 \quad (49)$$

【0 2 0 1】

次に、式(48)で発生した温度が定常になるまでの過程は、1次遅れの応答になることが知られている。そこで、式(48)の温度上昇 $T_U$ を目標値とする温度上昇の応答は、式(45)と式(48)から次式で表すことができる。尚、式中の $\tau_M$ は熱時定数である。

【0 2 0 2】

【数 5 0】

$$\left. \begin{aligned} T_{x(k+1)} &= P_M T_{x(k)} + (1 - P_M) T_U \\ P_M &= \exp \left\{ -\frac{t_{\text{cmp}}}{\tau_M} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

【0203】

次に、温度係数  $\alpha_W$  ・ 基準温度  $T_{MS}$  ・ 基準抵抗  $R_{MS}$  の特性を持つ巻線の温度  $T_x$  における巻線抵抗  $R_M$  は、次式となる。尚、 $T_x$  は、式 (50) で表す推定温度  $T_{x(k+1)}$  である。

【0204】

【数 51】

$$R_M = R_{MS} \{ 1 + \alpha_W (T_{x(k+1)} - T_{MS}) \} \quad (51)$$

【0205】

式 (51) は、次の標準化時期の巻線抵抗値を与える式である。尚、雰囲気温度を考慮する時は、その温度を式 (51) の温度項に追加する。

(4) 機能モデル

以上の関係を整理したモデル化した機構モデルを組み込んだ機能モデルは、図 28 となる。

【0206】

図 32 の機能モデルは、供給要素と流動損失特性の基本機能要素が組み合わさっている。また、機構モデルは、モータの巻線抵抗の消費電力  $P_M$  を機構モデルに与え、機構モデルから温度上昇による巻線抵抗  $R_M$  の更新値を機能モデルに与えている。また、同図の巻線抵抗  $R_M$  の出力位差量には、温度上昇  $T_x$  が温度エネルギーとして蓄積されている。

【0207】

図 28 の機能モデルは、次の支配方程式となる。

【0208】

【数 5 2】

$$\begin{bmatrix} I_{MO} \\ V_{MO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_B} & \frac{E_0}{R_B} \\ 1 & E_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Mi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (52)$$

【0209】

#### (5) シミュレーション結果

図 28 の機能モデルについて表 5 の特性値でシミュレーションを行なった結果は、図 29 になる。

【0210】

シミュレーションは、0 [sec] で 12 [V] の電圧を加えて 1500 [sec] で切った時の結果である。この時の電流は、モータの回転が固定されたロック状態を想定して入力電圧  $V_{Mi}$  を 0 [V] にした。図 29 において、電源 ON 後の温度上昇によって目標値  $T_U$  が低下するのは、温度上昇によって巻線の抵抗値が増加し、消費電力が低下するためである。そして、時間の経過と共に  $T_U$  と  $T_x$  が一致して加熱と放熱がバランスした定常状態になっている。

【0211】

【表 5】

巻線温度上昇の特性表

特性名	記号	単位	特性値
基準温度の巻線抵抗	$R_{MS}$	[Ω]	2.0
巻線抵抗の基準温度	$T_{MS}$	[℃]	25.0
巻線の温度係数	$\alpha_w$		$4.3 \times 10^{-3}$
モータ巻線の熱時定数	$\tau_M$	[sec]	200.2
モータ巻線の熱放散係数	$\delta_M$	[W/deg]	1.8
電源電圧	$E_0$	[V]	12.0
電源の内部抵抗	$R_B$	[Ω]	0.001

【0212】

#### 6. 残量警告灯のモデル化

一般の製品や部品の複雑な系では、緩慢な過渡応答を定常特性（静特性）がゆっくり変化する非線形と見なし、近似的に機構モデルに置き換えて、高速応答する線形機能モデルに組み込むことができる。その例に負特性抵抗素子の無接点スイッチ機能を利用した残量警告灯がある。

#### （１）液位検出の原理

残量警告灯の部品構成と接続を図 3 0 に示す。残量警告灯の動作は、図 3 0 で示すタンク内の液面高さが  $L_0$  より上のときは警告灯が消灯し、下になったとき点灯する至って簡単な系である。これに使用するサーミスタは、温度により抵抗値が変化する素子で、電子回路や温度計測に幅広く利用されている汎用的な非線形抵抗素子ある。このシステムは、自動車の発進・停止や車体振動による液面の揺れによる警告灯のチラツキを防ぐ機能面と、低価格で高信頼性の品質面が要求されるが、これをサーミスタの非線形特性をうまく利用して解決している。

#### 【 0 2 1 3 】

この系の回路図（構造モデル）を図 3 1 に示す。

#### 【 0 2 1 4 】

図 3 1 は、 $R_B$  が電池の内部抵抗・ $E_0$  が電池の内部起電力・ $R_L$  が警告灯の抵抗・ $R_T$  がサーミスタの抵抗である。そして、これらが直列に接続されている。状態量は、 $V_B$  が電源電圧・ $V_L$  が警告灯の端子電圧・ $V_T$  がサーミスタの端子電圧・ $I_B$  が 3 部品共通の電流である。

#### 【 0 2 1 5 】

残量警告灯をモデル化するにあたり、サーミスタ抵抗  $R_T$  が負荷の警告灯抵抗  $R_L$  を操作する無接点スイッチの働きについて簡単に述べておく。 $R_T$  と  $R_L$  の電圧－電流特性とその関係を図 3 2 に示す。

#### 【 0 2 1 6 】

図 3 2 は、抵抗  $R_L$  の電圧  $V_L$  は電源電圧  $V_B$  からの電圧降下と考え、原点を電圧軸上の  $V_B$  点に移した逆方向の電圧－電流特性で表してある。また、 $R_T$  と  $R_L$  の交点は、回路を流れる電流  $I_B$  となり、交点の左側がサーミスタに加わる電圧  $V_T$ 、交点の右側から  $V_B$  までが警告灯に加わる電圧  $V_L$  となる。また、同図のサーミスタ抵抗  $R_T$  は、低温で大きく高温で小さくなる抵抗特性を持っているので

、抵抗値が大きい  $R_{T\_OFF}$  の交点が OFF 状態となり、小さい  $R_{T\_ON}$  の交点が ON 状態になるスイッチとして働く。この両者は直列に接続されているので、OFF 状態では電流  $I_{B\_OFF}$  が漏洩電流、 $V_{T\_OFF}$  がサーミスタによる遮断電圧、 $V_{L\_OFF}$  が警告灯の消灯電圧となる。同様に ON 状態では、電流  $I_{B\_ON}$  が点灯電流、 $V_{T\_ON}$  がサーミスタの電圧降下、 $V_{L\_ON}$  が警告灯の点灯電圧となる。

【0217】

またサーミスタは、図 3 1 に示されているように常に警告灯を通して電流  $I_B$  が流れ、 $V_T I_B$  又は  $I_B^2 R_T$  の消費電力  $W_T$  によって自己発熱を起こし温度上昇を伴う。液位が高い時は、サーミスタが液中にあり発生した熱は周りの液で冷却されてサーミスタ抵抗  $R_T$  が大きくなり、回路電流  $I_B$  が小さい OFF 状態となる。また、液位が下がって空中に出た時は、サーミスタが冷却されないで温度が上昇してサーミスタ抵抗  $R_T$  が低下し、回路電流  $I_B$  の増加に伴って消費電力  $W_T$  が増加して加熱し、更に  $R_T$  の低下による  $I_B$  の増加を招き熱暴走を起こす。この熱暴走は、警告灯の抵抗  $R_L$  による回路電流  $I_B$  の抑制によって、ON 状態に遷移するに従いサーミスタの端子電圧  $V_T$  が小さくなって消費電力  $W_T$  が低下し、サーミスタの自己発熱と放熱の平衡点で ON 状態を維持する。ここで警告灯の抵抗  $R_L$  は図 3 2 に示すようにサーミスタとは逆に、電圧が低いときに抵抗が小さく高いときに大きくなる正特性の非線形性を持持っている。残量警告灯は、この両者の静特性と負特性の非線形性を生かして、漏洩電流の少ない OFF 状態と電圧降下の少ない ON 状態を実現している。また前に触れた表示のチラツキについては、ON / OFF 間を遷移するサーミスタの温度に対する応答遅れを利用して防止している。

## (2) 機能モデル

以上の内容を整理してモデル化して機構モデルが組み込まれた機能モデルを図 3 3 に示す。

【0218】

図 3 3 は、電池が内部抵抗  $R_B$  を介して起電力  $E_0$  と端子電圧  $V_B$  の差で電流を供給する電流源になっている。警告灯の抵抗  $R_L$  は電圧に依存する機構モデルを持ち、サーミスタ抵抗  $R_T$  は消費電力  $W_T$  に依存する機構モデルをもっている。



そして、自己発熱による温度上昇  $T_x$  がサーミスタの出力位差量に含まれている。各機構モデルの詳細は、後で説明する。

【0 2 1 9】

図 3 3 から数学モデルを導くと、次のようになる。

【0 2 2 0】

電池の数学モデルは、次式となる。

【0 2 2 1】

【数 5 3】

$$I_B = \frac{1}{R_B} (E_0 - V_B) \quad (5 3)$$

【0 2 2 2】

警告灯とサーミスタによる直列回路の各端子電圧は、次のようになる。

【0 2 2 3】

【数 5 4】

$$V_B = (R_L + R_T) I_B \quad (5 4)$$

【0 2 2 4】

【数 5 5】

$$\left. \begin{aligned} V_T &= R_T I_B \\ V_L &= R_L I_B \end{aligned} \right\} \quad (5 5)$$

【0 2 2 5】

式 (5 3) ・ 式 (5 4) ・ 式 (5 5) を互いに代入して整理した結果は、次のようになる。

【0 2 2 6】

【数 5 6】

$$I_B = \frac{1}{R_B + R_L + R_T} E_0 \quad (56)$$

【0 2 2 7】

【数 5 7】

$$\left. \begin{aligned} V_T &= \frac{R_T}{R_B + R_L + R_T} E_0 \\ V_L &= \frac{R_L}{R_B + R_L + R_T} E_0 \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

【0 2 2 8】

式 (56) と (57) から残量警告灯の支配方程式は、以下となる。

【0 2 2 9】

【数 5 8】

$$\begin{bmatrix} I_B \\ V_T \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_0 E_0 \\ R_T G_0 E_0 \\ R_L G_0 E_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

【0 2 3 0】

ここで、 $G_0$  は、次式で示す全系の総合コンダクタンスとする。

【0 2 3 1】

【数 5 9】

$$G_0 = \frac{1}{R_b + R_T + R_L} \quad (59)$$

【0232】

式(58)は、状態方程式と入出力方程式を持たない観測方程式で構成された定常特性の式である。

(3) 機構モデル

(a) 警告灯の機構モデル

警告灯には、定格電圧12[V]・定格電力1.4[W]の自動車用白熱電球を使用する。表6にその仕様を示す。

【0233】

【表6】

警告灯の仕様

	特性名	記号	単位	特性値
警告灯	電力	$W_L$	[W]	1.4
	電圧	$V_L$	[V]	14.0
	電流	$I_B$	[A]	$0.1 \pm 0.01$
	光束	$\Phi_L$	[lm]	90.0
サイズ	長さ	$L$	[mm]	19.5
	幅	$W$	[mm]	11.3
	高さ	$H$	[mm]	11.0

【0234】

電圧－電流特性は、次式になることが知られている。

【0235】

【数60】

$$\frac{I_B}{I_S} = \left( \frac{V_L}{V_S} \right)^n \quad (60)$$

【0236】

式(60)は、 $V_S$ が特性を設定する基準電圧、 $I_S$ が基準電圧 $V_S$ における基準電流である。この式から警告等の非線形抵抗の式を導くと次のようになる

【 0 2 3 7 】

【数 6 1】

$$\frac{I_B}{I_S} = \frac{V_L}{V_S} \left( \frac{V_L}{V_S} \right)^{n-1} \quad (61)$$

【 0 2 3 8 】

式 (61) をオーム則で整理した非線形抵抗の式は、次のようになる。

【 0 2 3 9 】

【数 6 2】

$$R_L = R_S \left( \frac{V_S}{V_L} \right)^{n-1} \quad (62)$$

【 0 2 4 0 】

ここで  $R_S$  は基準電圧  $V_S$  における基準抵抗で式は、次のようになる。

【 0 2 4 1 】

【数 6 3】

$$R_S = \frac{V_S}{I_S} \quad (63)$$

【 0 2 4 2 】

式 (63) の非線型抵抗  $R_L$  を機構モデルで表すと、図 3 4 となる。

【 0 2 4 3 】

式 (62) から警告灯の抵抗  $R_L$  を電圧・電流の測定値から乗数  $n$  を求める。  
測定結果は図 5 となり、点線が測定値、実線が計算値である。この結果から、最小二乗法で求めた乗数  $n$  は、 $n \doteq 0.55$  となり、基準電圧を  $V_S = 14$  [V] とした基準電流は  $I_S = 0.102$  [A] である。

(b) 負特性抵抗素子の機構モデル

サーミスタの外観を図 3 6 示し、機構モデルを図 3 7 に示す。同図のサーミスタは、液が出入りする 3 個の穴を上下に開けた円筒形金属ケースに収められている。

【0 2 4 4】

図 3 7 は、サーミスタの特性式から必要な数学モデルを導き、これを基にモデル化した。サーミスタの非線形抵抗特性は、温度に依存性する次式となる。

【0 2 4 5】

【数 6 4】

$$R_T = R_0 \exp \left( B_T \left( \frac{1}{T_x} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad (6 4)$$

【0 2 4 6】

式 (6 4) は、 $T_0$  が基準温度、 $B_T$  がサーミスタ特性を決める B 定数、 $R_0$  が  $T_0$  における基準抵抗、 $T_x$  が使用温度である。

サーミスタの自己発熱による上昇温度  $T_U$  は、熱放散係数  $\delta_T$  と消費電力  $W_T$  から次式となる。

【0 2 4 7】

【数 6 5】

$$T_U = \frac{W_T}{\delta_T} + T_0 \quad (6 5)$$

【0 2 4 8】

図 3 3 の機能モデルからサーミスタの消費電力  $W_T$  は、次のようになる。

【0 2 4 9】

【数 66】

$$\begin{aligned}
 W_T &= I_B V_T \\
 &= I_B^2 R_T
 \end{aligned}
 \tag{66}$$

【0250】

式(64)・式(65)・式(66)によってサーミスタの消費電力 $W_T$ による温度上昇から抵抗値 $R_T$ を求めことできるが、この一連の式は温度上昇後の定常状態の式である。そこで、サーミスタの熱時定数(乾燥状態)から、実用状態に近い液中と空中を移動する時の応答特性をモデル化する。この状態は、サーミスタが濡れた状態から乾燥する状態とその逆の状態があるので、立ち上がりの遅れを考慮した、2次遅れの過渡モデルを適用する。2次遅れの式は、前に述べた温度上昇モデルと同様に0～1の範囲で正規化した、次の離散化式を使用する。

【0251】

【数 67】

$$\left. \begin{aligned}
 X_{a(k+1)} &= P_a X_{a(k)} + (1-P_a) \frac{1-G_{ab}}{2} T_{U(k)} \\
 X_{b(k+1)} &= P_b X_{b(k)} + (1-P_b) \frac{1+G_{ab}}{2} T_{U(k)} \\
 T_{x(k)} &= X_{a(k)} + X_{b(k)}
 \end{aligned} \right\}
 \tag{67}$$

【0252】

式(67)は、一次遅れの離散化式2個が干渉した2次の応答特性式である。同式の $P_a \cdot P_b$ は0～1の範囲の値を持つ離散系固有値で、 $G_{ab}$ は2個の1次遅れの入力を分配する係数で、式は次のようになる。

【0253】

【数 68】

$$\left. \begin{aligned} P_a &= \exp\{-t_{smp} / \tau_a\} \\ P_b &= \exp\{-t_{smp} / \tau_b\} \\ G_{ab} &= \frac{\tau_a + \tau_b}{\tau_a - \tau_b} \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

【0254】

式(68)は、 $t_{smp}$ が標本化周期、 $\tau_a$ と $\tau_b$ が時定数である。

【0255】

サーミスタが液中から空中に出る時と空中から液注に入る時では、濡れ方に違いから放熱が異り、当然応答特性も異なる。この点を考慮して式(65)の $\delta_T$ と式(68)の $\tau_a$ 、 $\tau_b$ を液中と空中で切替える。この2状態を切り替えるスイッチ要素を $S_w$ とし、液中をwat、空中をdryの下付き添字で識別した、 $\delta_T$ と $\tau_a$ 、 $\tau_b$ を次式で表す。

【0256】

【数 69】

$$\left. \begin{aligned} \tau_a &= \tau_{a\_wat} S_{W\_0} + \tau_{a\_dry} S_{W\_1} \\ \tau_b &= \tau_{b\_wat} S_{W\_0} + \tau_{b\_dry} S_{W\_1} \\ \delta_T &= \delta_{T\_wat} S_{W\_0} + \delta_{T\_dry} S_{W\_1} \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

【0257】

式(69)のスイッチ要素は、液中が $S_{W\_0}=1$ と $S_{W\_1}=0$ 、空中が $S_{W\_0}=0$ と $S_{W\_1}=1$ とする。

(4) シミュレーション結果

残量警告灯のシミュレーションは、機能・機構モデルの式に表7の特性値を与えて行った。その結果を図38と図39に示す。

【 0 2 5 8 】

【表 7】

残量警告灯の特性値

特性名	記号	単位	特性値
警告灯	基準電圧	$V_s$ [V]	14.0
	基準電流	$I_s$ [A]	0.102
	非線形係数	$n$	0.55
サーミスタ	基準温度	$T_0$ [K]	298.0
	基準抵抗	$R_0$ [ $\Omega$ ]	500.0
	B 定数	$B_T$ [K]	4000.0
	熱放散係数(液中)	$\delta_{T\_wa}$ [W/deg]	1.1
	熱放散係数(空中)	$\delta_{T\_dry}$ [W/deg]	0.001
	時定数(a)	$\tau_{a\_wat}$ [sec]	20.0
	時定数(b)	$\tau_{b\_wat}$ [sec]	4.0
	時定数(a)	$\tau_{a\_dry}$ [sec]	5.0
	時定数(b)	$\tau_{b\_dry}$ [sec]	0.8
	起電力	$E_0$ [V]	14.0
	内部抵抗	$R_B$ [ $\Omega$ ]	0.001
電池			



【0259】

図38は、サーミスタを液中と空中に出し入れした時のステップ応答である。同図は上から順に、 $S_W$ が液中と空中の条件判定、 $V_T \cdot V_L$ がサーミスタと警告灯の端子電圧、 $I_B$ が回路電流、 $T_X \cdot W_T$ がサーミスタ温度と消費電力である。

【0260】

図39は、図38と同じ内容で表した、液面の揺れによりサーミスタが液を被る周期を2[s e c]とした再現した応答結果である。同図は、周期内における乾きの時間比率を0[%]～50[%]～100[%]で変化させ、50[%]については30[s e c]間継続した。

## 7. 係数要素（揺動機構）

非線形係数要素の代表例として、リンク機構がある。この非線形係数のモデル化は、係数要素（基本機能要素）の係数を非線形にする機構モデルの組み込みで実現できる。そのモデル化の例として図40に示す回転運動を揺動運動に変換する揺動機構について検討する。

【0261】

図40は、回転節 $A_1$ と揺動節 $A_2$ から成る揺動機構の構造モデルである。ここで、 $R$ は節長（半径）・ $\theta$ は回転角・ $f$ は連結点の作用力・ $v$ は連結点の速度・ $T$ はトルク・ $\omega$ は角速度である。添字1と2は、それぞれの回転節と揺動節を意味する。 $L_0$ は回転中心間の距離である。また、 $R_1$ は一定であるが、 $R_2$ は運動と共に変化する。尚、両節は剛体とし、慣性モーメントと回転抵抗は無視する。

### （1）機能モデル

モデル化にあたり、基本機能要素の係数を非線形伝達係数 $\Phi$ とする機能モデルは、次式となる。

【0262】

【数70】

$$\left. \begin{array}{l} T_2 = \Phi T_1 \\ \omega_1 = \Phi \omega_2 \end{array} \right\} \quad (70)$$

【0263】

次に式 (7 0) の非線形伝達係数  $\Phi$  に組み込む機構モデルのモデル化を行う。  
 揺動機構の機構モデルは、その係数を決定する回転角を回転節  $A_1$  の回転角  $\theta_1$  または揺動節  $A_2$  の回転角  $\theta_2$  にするかで非線形伝達係数  $\Phi$  が異なり、回転角  $\theta_1$ ・ $\theta_2$  に対応した非線形伝達係数  $\Phi_a$ ・ $\Phi_b$  は互いに逆数関係となる。

(2) 機構モデル 1 (回転節入力の揺動モデル)

まず図 4 1 は、揺動節  $A_2$  の角速度  $\omega_2$  で非線形伝達係数  $\Phi_a$  を決める機構モデルが組み込まれた機能モデルである。尚、機構モデルの  $\omega_-$  は推定角速度、 $\theta_{2-}$  は推定角度である。

【0 2 6 4】

図 4 1 の支配方程式と結合条件式は、次式となる。

【0 2 6 5】

【数 7 1】

$$\left. \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\Phi_a \\ \Phi_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \\ \omega = \omega_2 \\ \Phi = \Phi_a \end{array} \right\} \quad (7 1)$$

【0 2 6 6】

図 4 1 の非線形伝達係数  $\Phi_a$  は、次のようになる。

【0 2 6 7】

【数 7 2】

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{2-} = \int \omega_- dt \\ \Phi_a = 1 - \frac{L_0 \cos(\pi - \theta_{2-})}{\sqrt{R_1^2 - L_0^2 \sin^2(\pi - \theta_{2-})}} \end{array} \right\} \quad (7 2)$$

【0 2 6 8】

式 (7 2) は、上側が揺動節  $A_2$  の推定回転角  $\theta_{2-}$ 、下側が非線形伝達係数  $\Phi_a$  である。尚、同式の下側は、全てのパラメータが形状を表すので、図 4 1 では形

状モデルの 8 角形の枠となっている。また、式 (7 2) の右辺分母が 0 の時は、揺動節  $A_2$  が最大揺動回転角  $\theta_{2\_max}$  となり非線形伝達係数  $\Phi_a$  は  $\infty$  となる。この最大揺動回転角  $\theta_{2\_max}$  は次式となる。

【0 2 6 9】

【数 7 3】

$$\theta_{2\_max} = \sin^{-1} \left( \frac{R_1}{L_0} \right) \quad (7 3)$$

【0 2 7 0】

尚、この時の揺動節長  $R_2$  は次式となり、上側が回転節  $A_1$  の回転角  $\theta_1$ ・下側が揺動節の回転角  $\theta_2$  で表した式となる。

【0 2 7 1】

【数 7 4】

$$\begin{aligned} R_2 &= \sqrt{L_0^2 + R_1^2 - 2L_0R_1 \cos \theta_1} \\ &= L_0 \cos(\theta_2) - \sqrt{R_1^2 - L_0^2 \sin^2(\theta_2)} \end{aligned} \quad (7 4)$$

【0 2 7 2】

式 (7 2)・(7 4) は、図 4 0 で示す機構の幾何学的関係と連結点の荷重と速度ベクトルから、簡単に導くことができる。

### (3) 機構モデル 2 (揺動節入力の揺動モデル)

次に、回転節  $A_1$  の角速度  $\omega_1$  を観測量にする非線形伝達係数  $\Phi_b$  を組み込んだ機能モデルを図 4 2 に示す。尚、同図は、図 4 1 と双対関係となる。図 4 2 は、駆動側の回転節  $A_1$  に慣性モーメント  $J$  を、負荷側の揺動節  $A_2$  に抵抗係数  $C$  の付加機能を接続している。また外部からはトルク  $T_i$  を慣性モーメント  $J$  に与えて角速度  $\omega_i$  を出力している。

【0 2 7 3】

図 4 2 の機能モデルは、次の支配方程式と結合条件式で表すことができる。

【 0 2 7 4 】

【数 7 5】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ T_2 \\ 0 \\ \theta_{1-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J & -\Phi_b^2 C & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_b C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ t_{smp}^2 & t_{smp} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_J \\ x_J \\ T_i \\ x'_{BB} \\ x_{BB} \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \omega = \omega_1 \\ \Phi = \Phi_b \end{array} \right\}$$

( 7 5 )

【 0 2 7 5 】

式 ( 7 5 ) は、 1 ～ 2 行目が状態方程式と入出力方程式、 3 ～ 4 行目が観測方程式、 5 ～ 6 行目が回転角  $\theta_1$  を推定観測方程式である。尚、式中の  $x'_{BB}$  と  $x_B$  は、角速度  $\omega_1$  の内部蓄積観測量である。図 4 2 の非線形伝達係数  $\Phi_b$  の機構モデルは、次式となる。

【 0 2 7 6 】

【数 7 6】

$$\Phi_b = \frac{R_1^2 - R_1 L_0 \cos(\theta_{1-})}{R_1^2 + L_0^2 - 2 R_1 L_0 \cos(\theta_{1-})} \quad ( 7 6 )$$

【 0 2 7 7 】

式 ( 7 6 ) の下側は、式 ( 7 2 ) と同様に形状モデルである。

( 4 ) シミュレーション結果

次に、図 4 2 の機能モデルに表 8 の揺動機構の特性値を与えた時のシミュレー

ション結果を、図 4 3 と図 4 4 に示す。

【0 2 7 8】

【表 8】

揺動機構の特性値			
特性名	記号	単位	特性値
慣性モーメント	$M$	$[\text{N}/\text{m}^2]$	0.1
抵抗係数	$C$	$[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$	0.3
回転節の半径	$R_1$	$[\text{m}]$	0.02
回転中心間の距離	$L_0$	$[\text{m}]$	0.05

【0 2 7 9】

図 4 3 は、外部から  $0.05 [\text{Nm}]$  のトルク  $T_1$  をステップ状に加えた時の各状態量の応答特性で、上側が回転節の角速度  $\omega_1 [\text{rad}/\text{sec}]$ 、次が揺動節の角速度  $\omega_2 [\text{rad}/\text{sec}]$ 、最後が揺動節のトルク  $T_2 [\text{Nm}]$  である。各状態量とも、非線形係数  $\Phi_b$  によって歪みを持った波形となっている。

【0 2 8 0】

図 4 4 は、非線形係数  $\Phi_b$  の角度に対する伝達特性の線図で、図 4 3 の状態量の歪みは、この線図が示す伝達特性によって決定されている。図中の矢印は、回

転節 A 1 が反時計方向に回転した時の非線形伝達係数  $\Phi_b$  の変化方向を表しており、当然、時計方向の回転では矢印が逆方向になる。

## 8. 流動蓄積要素（円錐バネ）

### （1）機能モデル

図 4 5 は、線形の流動蓄積要素（基本機能要素）に、変形量と共に変化するバネのこわさをグラフ表現した機構モデルの例である。同図は、速度  $v_1$  と  $v_2$ ・外力  $f_1$  と  $f_2$ ・内部状態量  $x$  の線形機能モデルである。また、 $v_i$  はバネの変形速度差を示す。また、同図に組み込まれている機構モデルは、バネのこわさ  $K_d$  が変形量  $\delta$  の関数になっていることを示すグラフである。このグラフにより線形のバネから非線形バネまで表すことができる。尚、図中の  $\delta_0$  はオフセット荷重を生成する撓み量である。

【0281】

図 4 5 の流動蓄積特性は、下記の支配方程式と結合条件式で表わすことができる。

【0282】

【数 7 7】

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{c} 0 \\ f_1 \\ f_2 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cccc} -K & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} x' \\ x \\ v_1 \\ v_2 \end{array} \right] \\ v_d = V_i \\ K = K_d \end{array} \right\} \quad (77)$$

【0283】

図 4 5 のバネのこわさの機構モデルは、下記の数学モデルで表すことができる。

【0284】

【数 7 8】

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \int v_d dt \\ K_d &= fnc(\delta + \delta_0) \end{aligned} \right\} \quad (78)$$

【0 2 8 5】

式 (78) は、1 行目が速度差を積分したバネの撓み  $\delta$  を表し、2 行目に  $fnc(a)$  が非線形バネのこわさ  $K_d$  を決める関数である。

(2) 機構モデル (非線形バネモデル)

非線形バネの代表的な例に、円錐バネがある。図 4 6 (a) に等ピッチに巻かれた円錐バネの構造を示し、同図 (b) は撓み  $\delta$  と荷重  $F$  の関係を表すグラフである。図中の記号は、 $H_0$  が自由長、 $R_1$  が小さい側の有効半径、 $R_2$  が大きい側の有効半径、 $d$  がコイルの径、 $P$  がコイルのピッチを表している。またバネは、自由長の巻数を  $n$ 、横弾性係数を  $G$  とする。

【0 2 8 6】

図 4 6 (a) において円錐バネは、径の大きい側のねじりモーメントが大きく撓み易いことから、コイル同士の接触が径の大きい側から順次始まる。同図 (b) において、バネ特性としては、接触前の 0 ～ A 間では撓み  $\delta$  と荷重  $F$  の関係が比例し、接触後の A ～ B 間では有効巻数が減少して撓み  $\delta$  に対する荷重  $F$  が増加する。最後に B 点では小さい径側が接触して底突きを起こし剛体となる。

【0 2 8 7】

この円錐バネについては、良く知られているので参考文献から関係式を引用する。荷重  $F$  と撓み  $\delta$  には、次の関係がある。

&lt;接触前のバネ荷重と撓み (線形域)&gt;

【0 2 8 8】

【数 7 9】

$$\delta = \frac{16n}{Gd^2} (R_2^2 + R_1^2) (R_2 + R_1) F \quad (79)$$

【0 2 8 9】

< 接触後のバネ荷重と撓み（非線形域） >

【0 2 9 0】

【数 8 0】

$$\left. \begin{aligned} R &= R_2 - (R_2 - R_1) \frac{n'}{n} \\ d' &= d \sqrt{1 - \left( \frac{R_2 - R_1}{nd} \right)^2} \\ F &= \frac{Gd^4}{64R^3} (p - d') \\ \delta &= \frac{n}{R_2 - R_1} \left\{ \frac{16(R_2^4 - R_1^4)}{Gd^4} F + (p - d')(R_2 - R) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (80)$$

【0 2 9 1】

式（80）は接触後の非線形域を表し、1行目が $R_2$ 側から $n'$ 番目のコイルが接触した時の平均半径 $R$ の近似式、2行目が接触したコイル間の上下方向の中心距離 $d'$ 、3と4行目が荷重 $F$ と撓み $\delta$ の関係を表す。式（79）・式（80）の円錐バネの式から図45に組み込む機構モデルについて、モデル化を行う。

【0 2 9 2】

式（80）の各式を整理して式（79）の線形式を荷重比 $\Phi$ で非線形化する式は、次のようになる。

【0 2 9 3】



【数 8 1】

$$F = K \frac{1}{\Phi} \delta \quad (81)$$

【0 2 9 4】

【数 8 2】

$$K = \frac{Gd^2}{16n(R^2 + R_1^2)(R_2 + R_1)} \quad (82)$$

【0 2 9 5】

【数 8 3】

$$\Phi = \left\{ 1 - \frac{4}{(R_2 - R_1)} \frac{R^3(R_2 - R)}{(R^2 + R_1^2)(R + R_1)} \right\} \frac{1}{d^2} \quad (83)$$

【0 2 9 6】

式(81)は円錐バネの荷重－撓み特性を表す式である。線形域のバネのこわさKは、式(82)のRが $R_2$ となり、同式の荷重比が $\Phi = 1$ となる。また、非線形域では、式(80)の1行目から接触するコイル毎に順次有効半径Rを求め、これを式(82)と(83)のRに代入して求める。この方法で求めた荷重Fと撓み $\delta$ の関係は、事前に計算しておき、推定速度 $v_d$ を積分した撓み $\delta$ 検索して求めたバネのこわさ $K_d$ を機能モデルのKに代入する。この関係を表した機能・機構モデルを図47に示す。

【0 2 9 7】

図47は、図45の機能モデルに円錐バネの機構モデルを組み替えたものであり、式(78)の2行目の関数が撓み $\delta$ からバネのこわさKを検索する関数に置き換わる。

## 9. 位差蓄積要素（可変慣性モーメント）

慣性モーメントが非線形になる機構として、遠心ガバナーおよび遠心クラッチなどの機械要素がある。図 4 8 は、このような機構要素の例を表した図である。

【0 2 9 8】

図 4 8 は、図示方向を正回転とするトルク  $T_1$  が作用して角速度  $\omega_1$  を発生している。同図の回転系は、移動可能な可動質量  $M_m$  が遠心力を受けて並進する系を組み合わせた構造モデルである。この可動質量  $M_m$  は、半径  $R_m$  の円周上を回転し、遠心力  $F_e$  が作用して外側に速度  $V_e$  で移動する機構となっている。この回転系は、トルク  $T_1$  を受けて角速度  $\omega_1$  で回転するとき、可動質量  $M_m$  の円周方向の速度を  $V_m$ 、円周方向の慣性力を  $F_m$  とする。可動質量  $M_m$  の回転半径  $R_m$  の下限（停止位置）は  $R_0$  である。並進系は、可動質量  $M_m$  が回転することにより遠心力  $F_e$  が生じ、バネのこわさ  $K_m$  に抗して粘性抵抗係数  $C_m$  の抵抗力を受けながら、速度  $V_e$  で  $L_m$  だけ移動して回転半径  $R_m$  になる。この回転半径  $R_m$  の変化は、回転系の慣性モーメント  $J$  を変化させる。可動質量  $M_m$  は半径  $R_s$  まで移動すると剛性  $K_s$  のストッパーに接触し、移動しなくなる。尚、可動質量  $M_m$  を除く支持腕の慣性モーメントを  $J_0$  とし、バネのこわさ  $K_m$  は質量を有しないものとする。尚、停止位置  $R_0$  の剛性は考慮しない。

### （1）機能モデル

この可変慣性モーメント機構の特徴は、質量  $M$  が遠心力  $F_e$  によって慣性モーメント  $J$  を変化させることである。従って、機能モデルの基本構成は、位差蓄積要素（基本機能要素）の慣性モーメント  $J$  に、回転系の推定角速度  $\omega_1$  の観測量による遠心力  $F_e$  で移動した可動質量  $M_m$  の移動距離  $L_m$  の変動分を加えた慣性モーメント  $J_m$  を代入する機構モデルを有する。そして、遠心力  $F_e$  により移動する可動質量  $M_m$  の機能モデルが、この機構モデルの中に包含される。この関係を表した回転軸の機能・機構モデルを、図 4 9 に示す。尚、図 4 9 には、位差蓄積要素の基本要素に粘性抵抗係数  $C$  が追加されている。また、図中の質量  $M_m$  の出力位差系には、移動速度  $V_m$  の位差量と回転半径  $R_m$  の蓄積位差量が包含されている。

【0 2 9 9】

図 4 9 で示す機能モデルの支配方程式と結合条件は以下になる。

【 0 3 0 0 】

【数 8 4】

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_l \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -J & -C & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_J \\ x_J \\ T_l \end{bmatrix} \\ \omega_l &= \omega_{l-} \\ J &= J_m \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

【 0 3 0 1 】

(2) 機構モデル (遠心力モデル)

図 4 9 の機構モデルは、回転系と並進系を結合する回転並進変換、可動質量  $M_m$  の並進運動、可動質量  $M_m$  の回転半径  $R_m$  を決める、可動質量  $M_m$  のストッパーの機能で構成されている。

【 0 3 0 2 】

まず、回転並進変換の機構モデルは以下の数学モデルとなる。

【 0 3 0 3 】

【数 8 5】

$$\left. \begin{aligned} F_e &= R_m M_m \omega_{l-}^2 \\ J_m &= M_m R_m^2 + J_0 \end{aligned} \right\} \quad (85)$$

【 0 3 0 4 】

(式 8 5) は、上側が回転系による可動質量  $M_m$  の遠心力  $F_e$ 、下側が遠心力で変動する慣性モーメント  $J_m$  である。

【 0 3 0 5 】

次に遠心力  $F_e$  で可動質量  $M_m$  が並進運動する機能モデルは、次の支配方程式と

なる。

【0 3 0 6】

【数 8 6】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_m & 0 & -C_m & -1 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{K_m + K_s S_{ws}} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_m \\ x'_k \\ x_m \\ x_k \\ F_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ L_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ t_{smp}^2 & 0 & t_{smp} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_m \\ x'_L \\ x_m \\ x_{LL} \end{bmatrix}$$

(8 6)

【0 3 0 7】

(式 8 6) の上側は、並進運動の支配方程式で図 4 9 の  $K_m$  と  $K_s$  を積分量の加算結合で統合している。同式の下側は、可動質量  $M_m$  の蓄積位差を移動距離  $L_m$  で表した推定観測量である。尚、 $t_{smp}$  は標本化周期である。

【0 3 0 8】

同式から回転半径  $R_m$  の推定観測量は、次式となる。

【0 3 0 9】

【数 8 7】

$$R_m = R_0 + L_m \quad (8 7)$$

【0 3 1 0】

最後に、可動質量  $M_m$  の移動を制限するストッパーは、次式となる。

【0 3 1 1】

【数 8 8】

$$\left. \begin{array}{l} L_s = R_s - R_m \\ \text{if } (L_s \geq 0) \text{ then } (S_{ws} = 1) \text{ else } (S_{ws} = 0) \end{array} \right\} \quad (88)$$

【0 3 1 2】

式 (88) のストッパーに接触した時の条件判定は、非接触状態を  $S_{ws} = 0$  とし、接触状態を  $S_{ws} = 1$  とする。

【0 3 1 3】

これらの機構モデルを全体機構モデルとして組み立てる結合条件は次式となる。

【0 3 1 4】

【数 8 9】

$$\left. \begin{array}{l} V_c = V_m = V_s \\ F_c = F_{ci} \\ F_m = F_s \end{array} \right\} \quad (89)$$

【0 3 1 5】

(3) シミュレーション結果

図 49 の機能モデルについて、表 9 で示す特性値を使って行なったシミュレーション結果を図 50 に示す。

【0 3 1 6】

【表 9】

可変慣性モーメントの特性値			
特性名	記号	単位	特性値
回転系 慣性モーメント(支持腕)	$J_0$	$[\text{N}/\text{sec}^2/\text{rad}]$	0.01
粘性抵抗係数	$C$	$[\text{N}/(\text{m}/\text{sec})]$	2.5
並進系 可動質量	$M_m$	$[\text{N}/\text{sec}^2/\text{m}]$	0.2
粘性抵抗係数	$C_m$	$[\text{N}/(\text{m}/\text{sec})]$	10.0
ばねこわさ	$K_m$	$[\text{N}/\text{m}]$	2.0
ストッパー剛性	$K_s$	$[\text{N}/\text{m}]$	$1.0 \times 10^4$
回転半径下限	$R_0$	$[\text{m}]$	0.1
回転半径上限	$R_s$	$[\text{m}]$	0.5

【0 3 1 7】

図 5 0 において、シミュレーションは、最初に入力トルク  $T_1 = 20 [\text{N}]$  を加え、 $0.4 [\text{sec}]$  後に逆方向に  $T_1 = -20 [\text{N}]$  を加えて逆回転させ、再び  $0.9 [\text{sec}]$  後に正方向に  $T_1 = 20 [\text{N}]$  を加え、約  $1.45 [\text{sec}]$  付近でストッパーに接触した。図 5 0 の結果は、上から順に回転系の角速度

$\omega_1$  [rad/sec] ・ 可動質量  $M_m$  に作用する遠心力  $F_e$  [N] ・ 移動速度  $V_e$  [m/sec] ・ バネとストッパー剛性力  $F_S$  [N]、最後が可動質量  $M_m$  の回転半径  $R_m$  [m] である。

【0318】

シミュレーション結果は、入力トルク  $T_1$  の切替で可動質量  $M_m$  の遠心力  $F_e$  が瞬間 0 になり、再び復帰する。また移動速度  $V_e$  は切り替えの瞬間に低下するが復帰し移動を継続し、回転方向に無関係なことを示している。そして回転半径  $R_m$  が 0.5 [m] になった所でストッパーに接触している。接触状態では、衝突による反発から移動速度  $V_e$  とストッパー剛性の  $K_S$  の力  $F_S$  に減衰振動が発生している。この時の  $F_S$  の減衰振動波形は、下側が平坦になっている。これは、可動質量  $M_m$  がストッパーに接触した瞬間の反発力であることが判る。

## 10. 摩擦クラッチ

クラッチは、2つの系を滑らかに接続・開放するための基本的な機械要素である。その中で摩擦クラッチ機構は、動作中の系を切り替える機械要素として幅広く利用されている。ここでは、このクラッチの基本的な機能について、モデル化を検討する。

【0319】

クラッチには、常時接続する方式と常時開放する2種類の方式がある。図50は、常時開放する方式のクラッチ構造を模式的に表わした例で、クラッチの押し付け力  $F_f$  によって右側の白い角のクラッチ片が左側に押し付けられ、左右の系の間で動力伝達を行う。クラッチには、右側の系から  $\omega_1 \cdot T_1$  の回転エネルギーが加わり、同様に右側の系からも  $\omega_2 \cdot T_2$  が加わっている。この2つの系を接続したクラッチは、クラッチ剛性  $K$  で左右の系が一体となり、両系には同一エネルギーが受け渡しされる。滑り状態ではクラッチの摩擦トルクで左右の系が接続され両者の間には角速度差が生じる。この角速度差と摩擦トルクによって生じる損失は、熱エネルギーとなって消費される。またクラッチが開放された状態では左右の系は切り離され、互いに独立した系となる。

### (1) 基本機能

次に、クラッチの基本機能について検討を行う。クラッチは、接続・滑り・開

放の本来の機能と、2つの系が持つ各パラメータの付加機能に分けることができる。そして、この3つの状態に分けた機能は、以下のように考えることができる。

【0 3 2 0】

①接続は、2つの系に速度差が無くクラッチが滑らない状態。

【0 3 2 1】

②滑りは、クラッチの摩擦トルクで2つの系を駆動する状態。

【0 3 2 2】

③開放は、摩擦トルクが0となり2つの系が切り離された状態。

【0 3 2 3】

この3状態から摩擦トルクによる滑りが、クラッチの接続と開放を支配していることが判る。この関係を示すと図5 2となる。

【0 3 2 4】

図5 2は、横軸が摩擦トルク $T_f$ 、縦軸が負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ で表したクラッチのトルク伝達特性である。この図で示す $T_{f0}$ は、摩擦によるクラッチの伝達トルクである。この伝達トルク $T_{f0}$ により負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が小さい領域では、左右の系がクラッチ剛性 $K$ で一体となり、クラッチは接続状態となる。その外の領域では、伝達トルク $T_{f0}$ によって負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が供給され、クラッチは滑り状態となる。この伝達トルク $T_{f0}$ は、クラッチの押し付け力 $F_f$ で変化し、 $T_{f0} = 0$ のとき負荷トルクも $T_1 = T_2 = 0$ となり、クラッチは開放状態となる。従って、図5 2における接続と滑りの関係はクラッチを介して2つの系に加わる負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ と摩擦トルク $T_f$ の大小関係に支配される。例えば、負荷トルク $T_1 \cdot T_2$ が摩擦トルク $T_{f0}$ 以下のときは接続し、 $T_{f0}$ 以上のときは摩擦トルク $T_{f0}$ で滑りが発生する。この働きからクラッチは、2つの系を一体とするクラッチ剛性 $K$ 、クラッチの滑りを支配する伝達トルク $T_{f0}$ 、この両者の切り替えが基本機能となる。

## (2) 機能モデル (クラッチモデル)

クラッチの基本機能を元にモデル化した機能・機構モデルを図5 3に示す。同図は、常時開放する方式のクラッチモデルである。図5 3 (a) はクラッチ剛性



Kで接続するクラッチモデルを表し、同図（b）はクラッチ剛性Kを粘性抵抗係数Dに置き換えて、低次元化を行なったクラッチモデルである。両図は、Kが接続時のクラッチ剛性、Dがクラッチ摩擦片の粘性抵抗係数、 $T_f$ が摩擦トルク、 $T_c$ がクラッチの剛性トルク、 $S_{WC}$ が $T_c$ と $T_f$ を切替えるスイッチ要素で構成する機能モデルに、クラッチを操作する機構モデルが組み込まれている。xは内部状態量を示す。粘性抵抗係数Dに置き換えた図53（b）のクラッチモデルは、接続状態で微少な滑りが発生する。

【0325】

図53（a）の支配方程式は次式となる。尚、機構モデルの接続条件は省略する。

【0326】

【数90】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K} & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -S_{WC-1} & -DS_{WC-1} & DS_{WC-1} & -T_f S_{WC-0} \\ 0 & S_{WC-1} & DS_{WC-1} & -DS_{WC-1} & T_f S_{WC-0} \\ 0 & 1 & D & -D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_k \\ x_k \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (90)$$

【0327】

式（90）において、1行目は状態方程式、2と3行目は入出力方程式、4行目はクラッチトルクの観測方程式である。同様に図53（b）の支配方程式は、式（90）から状態方程式と内部状態量を除いた次式となる。

【0328】

【数 9 1】

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -DS_{WC\_1} & DS_{WC\_1} & -T_f S_{WC\_0} \\ DS_{WC\_1} & -DS_{WC\_1} & T_f S_{WC\_0} \\ D & -D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (91)$$

【0 3 2 9】

## (3) 機構モデル (結合判定モデル)

図 5 3 の (a) ・ (b) は、共に同じ機構モデルとなり、クラッチの剛性トルク  $T_{c-}$  を推定観測量とする条件判定  $S_{WC}$  と伝達トルク  $T_{f0}$  を代入量として出力している。機構モデルの内容は、以下のようになる。

【0 3 3 0】

伝達トルク  $T_{f0}$  は、次の摩擦トルクの式から求めることができる。

【0 3 3 1】

【数 9 2】

$$T_{f0} = \mu_f A_f R_f F_f \frac{T_{c-}}{|\hat{T}_c|} \quad (92)$$

【0 3 3 2】

ここで、 $\mu_f$  は摩擦材の動摩擦係数・ $A_f$  は摩擦面の摺動面積、 $R_f$  は摩擦面の平均半径、 $F_f$  はクラッチ押付荷重で、 $T_{f0}$  の正負は推定観測量  $T_{c-}$  と一致させる。

【0 3 3 3】

この例では、クラッチの摩擦トルク  $T_f$  を動摩擦トルクで表したモデルである。従って、クラッチの挙動を詳細に検討する際は、静摩擦・動摩擦および摩擦熱による摩擦トルク変動などを考慮する必要がある。

【0 3 3 4】

次に、クラッチの滑りと接続状態を判定する条件判定は、次のようになる。

【0 3 3 5】

【数 9 3】

$$\text{if } (|T_{f0}| \geq |T_c|) \text{ then } (S_{wc} = 1) \text{ else } (S_{wc} = 0) \quad (9\ 3)$$

【0 3 3 6】

式 (9 3) において、伝達トルク  $T_{f0}$  が剛性トルク  $T_c$  以上の時は  $S_{wc} = 1$  にして接続状態とし、逆は  $S_{wc} = 0$  の滑り状態とする。また、この滑り状態では、流動蓄積要素の内部状態量  $x_k$  を次式で初期化する。

【0 3 3 7】

【数 9 4】

$$\text{if } (S_{wc} = 0) \text{ then } (x_k = 0) \quad (9\ 4)$$

【0 3 3 8】

また、常時接続方式のクラッチモデルでは、条件判定式 (9 3) の比較演算子の判定を逆にした式  $|T_{f0}| \leq |T_c|$  となり、図 5 2 のスイッチ要素  $S_{wc\_0}$  と  $S_{wc\_1}$  を入れ替わる。

(4) シミュレーション結果

図 5 1 で示す構造モデルの左右に慣性モーメント  $J_D \cdot J_L$  と粘性抵抗係数  $C_D \cdot C_L$  の駆動系と負荷系を付加し、これに入力トルク  $T_D \cdot T_L$  と出力角速度  $\omega_D \cdot \omega_L$  の状態量で外部と接続する。その機能モデルを図 5 4 に示す。

【0 3 3 9】

図 5 4 の機能モデルには、図 5 3 (a) のクラッチ剛性  $K$  を考慮したクラッチモデルを使用する。 $x$  は内部状態量である。図 5 4 の支配方程式を次のようになる。

【0 3 4 0】

【数 9 5】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_D \\ \omega_L \\ T_2 \\ T_{C-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_D & 0 & 0 & -(C_D + DS_{WC-1}) & -S_{WC-1} & DS_{WC-1} & 1 & 0 & -T_f S_{WC-0} \\ 0 & \frac{1}{K} & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_L & DS_{WC-1} & S_{WC-1} & -(C_L + DS_{WC-1}) & 0 & -1 & T_f S_{WC-0} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DS_{WC-1} & S_{WC-1} & -DS_{WC-1} & 0 & 0 & T_f S_{WC-0} \\ 0 & 0 & 0 & D & 1 & -D & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ x_k \\ x_L \\ x_D \\ x_k \\ x_L \\ T_D \\ T_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

【0 3 4 1】

図 5 4 の機能モデルに表 1 0 の特性値を使用したシミュレーション結果を、図

5 5 に示す。尚、同図で示す角速度  $\omega_D$  は、速度  $\omega_L$  と対比するために正負が反転してある。

【 0 3 4 2 】

【表 1 0】

クラッチの特性値

特性名		記号	単位	特性値
駆動側	慣性モーメント	$J_D$	[Kg $m^2$ ]	0.0001
	粘性抵抗係数	$C_D$	[Nmsec/rad]	0.00025
負荷側	慣性モーメント	$J_L$	[Kg $m^2$ ]	0.0003
	粘性抵抗係数	$C_D$	[Nmsec/rad]	0.00035
クラッチ	クラッチ剛性	$K$	[rad/Nm]	0.1
	粘性抵抗係数	$D$	[Nmsec/rad]	0.015
	クラッチ摩擦トルク	$T_f$	[Nm]	0.1

【 0 3 4 3 】

図54のシミュレーションは、駆動系に0.1[N]のトルク $T_D$ を加えると同時にクラッチ摩擦トルク $T_f$ を0.25[Nm/sec]で上昇してクラッチを接続し、接続後は1.5[sec]後に、負荷トルク $T_L=0.145$ [Nm]を0.5[sec]の期間ステップ状に与えてクラッチを滑らせ、最期の3.5[sec]でクラッチを開放した結果である。図54は上から順に、駆動系のトルク $T_D$ [Nm]、クラッチの摩擦トルク $T_f$ [Nm]（側負荷）、負荷系のトルク $T_L$ [Nm]、駆動角速度 $\omega_D$ 側と負荷角速度 $\omega_L$ 、クラッチのトルク $T_1$ を表している。

## 【0344】

図55において、起動に際しては、駆動系の角速度 $\omega_D$ 側が上昇し摩擦トルク $T_f$ を増加することによって負荷系の負角速度 $\omega_L$ も上昇する。しかし、途中から駆動系は負荷系に引き続き込まれて角速度 $\omega_D$ が低下し、約0.5[sec]の点で両者が一致して結合状態（エンゲージ）となり両者は一体となって回転が上昇する。この結合までは、摩擦トルク $T_f$ によって負荷系が駆動され、クラッチの伝達トルク $T_1$ と摩擦トルク $T_f$ は同じとなる。エンゲージ後はクラッチ伝達トルク $T_1$ がクラッチ剛性によるトルクに置き換わり、急激に低下している。

## 【0345】

次に外部から負荷系にトルク $T_L$ を加えるとクラッチに加わるトルクは、摩擦トルク $T_f$ 以上になってクラッチが滑り初め $\omega_D$ と $\omega_L$ 間に角速度差が発生する。この時のクラッチ負荷トルク $T_1$ は再び摩擦トルク $T_f$ に置き換わる。この負荷トルク $T_1$ を除くと $\omega_D \cdot \omega_L$ 間の角速度差が無くなり、クラッチ結合状態となって再び回転が上昇する。最後に摩擦トルク $T_f$ を0にしてクラッチを切ると、駆動系と負荷系は別々に減速して停止する。

## 11. 摩擦ブレーキ

ブレーキは、エネルギーを強制的に吸収する速度調整、慣性モーメントなどの蓄積エネルギーを吸収するため基本的な機械要素の一つである。ブレーキにも多くの種類があるが、ここでは摩擦力を利用したブレーキについて検討する。

## 【0346】

摩擦ブレーキは、クラッチと同様に摩擦力で制動トルクを制御する。クラッチ

モデルをブレーキに応用するには、回転していた駆動系と負荷系の片側を固定してクラッチの滑りで消費するエネルギーを制動エネルギーとして駆動系に与えることで実現できる。負荷側の固定には、2通りの方法がある。一つは負荷側に剛性を接続するか、または図54の慣性モーメント $M_L$ を大きくする方法で、制動力が取り付け部に与える影響まで検討する時に適用する。今一つは図54の負荷側の慣性モーメント $M_L$ と粘性抵抗係数 $C_L$ を除いて角速度 $\omega_2$ を零にする方法で、ブレーキの制動機能を検討する時に適用する。ここでは、後者のブレーキモデルについて検討する。以下、この点を考慮したブレーキのモデル化を行う。ブレーキ構造を模式的に表した構造モデルを、図56に示す。同図は、軸の駆動側に角速度 $\omega_D$ ・駆動トルク $T_D$ を加え、負荷側に角速度 $\omega_D$ ・トルク $T_D$ を与える。この軸にはブレーキの摩擦トルク $T_F$ が制動トルクとして作用する構造になっている。

#### (1) 機能モデル (ブレーキモデル)

ブレーキはクラッチと異なり動力を伝達する機能を持たないので、動力を伝達する駆動軸に制動エネルギーを負荷として加えるモデルとなる。従って、ブレーキモデルは、駆動軸のモデルにクラッチモデルを並列に配した機能モデルとなる。これを機能・機構モデルで表すと図57となる。

#### 【0347】

図57は駆動軸の駆動側に慣性モーメント $J_D$ と粘性抵抗係数 $C_D$ が追加され、負荷側に慣性モーメント $J_L$ と粘性抵抗係数 $C_L$ が追加されている。同図において、 $\omega_1$ と $T_1$ はブレーキの角速度と制動トルクである。そして制動エネルギーを生成する機能は、図53(a)のクラッチモデルから右側の入出力状態量 $\omega_2$ と $T_2$ が除かれている。また、この機構モデルは、各特性の大半が図53(a)と同一であるが、その中の $\mu_f$ がブレーキパッドの動摩擦係数・ $A_f$ が摺動面積・ $R_f$ が摺動半径・ $F_f$ がブレーキ操作荷重に置き換わる。

#### 【0348】

図57で示す駆動側と負荷側の慣性モーメント $J_D$ ・ $J_L$ は、内部状態 $x_d'$ と $x_L'$ 同じなので、この微分量を加算結合して慣性モーメントを $J_D + J_L$ にすることができる。慣性モーメント $J_D$ ・ $J_L$ を統合したブレーキモデルの支配方程式

は、次のようになる。

【0 3 4 9】

【数 9 6】

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_D \\ T_1 \\ T_L \\ T_{C-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_D + J_L & 0 & 0 & -(C_D + C_L + DS_{WC-1}) & -S_{WC-1} & 1 & -T_f S_{WC-0} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & DS_{WC-1} & 0 & T_f S_{WC-0} \\ J_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D' \\ x_k' \\ x_D \\ x_k \\ T_D \\ 1 \end{bmatrix}$$

(96)

【0 3 5 0】



式（9 6）は、1～2行目が状態方程式、3行目が入出力方程式、4～5行目が観測方程式、6行目が推定観測方程式である。機構モデルについては、クラッチモデルの式（9 2）～式（9 4）と同じである。

（2）シミュレーション結果

図 5 7 で示す機能・機構モデルに、表 1 1 の特性値を与えて行ったシミュレーション結果を図 5 8 に示す。

【0 3 5 1】

【表 1 1】

ブレーキの特性値

特性名	記号	単位	特性値
駆動側	慣性モーメント	$J_D$ [Kg $m^2$ ]	0.0001
	粘性抵抗係数	$C_D$ [Nmsec/rad]	0.01
負荷側	慣性モーメント	$J_L$ [Kg $m^2$ ]	0.001
	粘性抵抗係数	$C_L$ [Nmsec/rad]	0.2
ブレーキ	クラッチ剛性	$K$ [rad/Nm]	$2.5 \times 10^4$
	粘性抵抗係数	$D$ [Nmsec/rad]	0.2
ブレーキ (機構)	動摩擦係数	$\mu_f$ [Nm]	0.1
	摺動面積	$A_f$ [m $^2$ ]	$1.0 \times 10^{-3}$
	摺動半径	$R_f$ [m]	$150.0 \times 10^{-3}$

【0352】

図58は、上から順に駆動軸の角速度 $\omega_D$  [rad/sec]・制御トルク $T_f$  [Nm]・推定観測量 $T_{c-}$  [Nm]・駆動トルク $T_D$  [Nm]・条件判定 $S_{WC}$ で

ある。

### 【0353】

シミュレーションの実行は、起動と同時に駆動トルク  $T_D = 1$  [Nm] を与え、 $0.02$  [sec] でブレーキ操作荷重  $F_f = 8 \times 10^4$  [N] 加えて制動を掛け、 $0.06$  [sec] で  $T_D = -1$  [Nm] の逆駆動トルクに切替えた。そして、 $0.08$  [sec] でブレーキ操作荷重を  $F_f = 2 \times 10^4$  [N/sec] の速度でゆっくり降下させて、 $0.1$  [sec] でブレーキを切った。

### 【0354】

図58において、 $0.02$  [sec] でブレーキを掛けると  $T_f < T_{c-}$  の状態になるので摩擦トルク  $T_f$  によって制動トルクが作用して角速度  $\omega_D$  が減速し、 $T_f > T_{c-}$  になった状態で強制的にブレーキによって停止させられる。更に  $0.06$  [sec] で駆動トルクを逆転させるとその反力で瞬間的にブレーキの滑りが角速度  $\omega_D$  に現われ、条件判定  $S_{WC}$  が瞬断する。また、 $0.08$  [sec] から徐々にブレーキをゆるめると  $T_f < T_{c-}$  になった時点からブレーキが滑り始め、角速度  $\omega_D$  も増加（逆方向）し始める。そしてブレーキを切ると加速する。

（非線形を含む機能モデルの処理手順）

これまでに述べた内容を整理し、機能モデルとこれに組み込まれた機構モデルによるシミュレーションを実行する基本手順について、簡単に触れておく。

### 【0355】

まず、線形機能モデル（支配方程式）に組み込まれる非線形パラメータとスイッチ要素の機構モデル（数学モデル）は、事前に計算してその結果を代入して更新する。従って、処理手順は、最初に機構モデルを実行して代入量を求め、次に線形機能モデルを実行する。この手順を処理フローで示すと、図59となる。

### 【0356】

図59は、小規模な機能モデルの支配方程式を離散化して実行する時の基本的な処理の流れである。図中の計算開始から終了までの繰り返しは、標本化周期を単位として行ない、この中で推定観測量の予測計算を行なう。実際に運用されるコンピュータソフトウェアは、標準化された実行環境のソフトウェアモジュール中に、全系の機能・機構モデルモジュールが入れ子方式で組み込まれる。この

時の各機構モデルは、標準関数として用意された機構モデル用モジュールを、使用目的に応じて呼び出しながら実行する。詳細な処理とその流れについては、割愛する。

(参考資料)

## 1. モデル化の記号

### (1) 線形モデルの記号

モデルを表すブロック線図は、一般的なブロック線図の規則を踏襲し、これに図 6 0 に示す記号を加えてモデル化する。図 6 0 で示す記号は、主に線形のモデルで使用する。

### (2) 非線形モデルの記号

雑多の種類がある非線形のモデル化には、それぞれに応じた表現法があるが、要は、非線形性の内容・性質・働きなどをモデル化する規則と方法を明らかにして視覚的に理解し、かつ数学モデルに変換可能な表現であればモデル化の目的を満たす。図 6 1 に非線形のモデル化に使用する代表的な記号を示す。

### (3) 非線形の信号

#### (1) 操作量

操作量とは、位差量・流動量以外の絶対値・符号・状態量の自乗などの変換された物理量と、スイッチ演算子などを操作する 0 (False) と 1 (True) などの論理的な信号を指す。ただし、入れ子構造にした機構モデルから組み込み相手の機能モデルのスイッチ要素を操作する場合は、次の代入量で表わすことが望ましい。尚、速度を積分した位置や変位なども、これで表わす場合がある。

【0 3 5 7】

#### (2) 代入量

代入量とは、機構モデルからパラメータに値を代入する線を指す。代入量の信号線名は、これらの非線形パラメータの変数名と同一名称にできる。この代入量によって機能モデルから機構モデルを独立させることができる。そして、この代入量の切り替が、非線形パラメータと機構モデルを入れ子方式にする。

### (4) 論理演算子

スイッチ要素には論理演算子を使用し、この操作に条件判定・推定観測量など

を使用する。

【0358】

(a) 推定観測量

条件判定などで一つ先の標準化周期の状態量を観測する記号がある。この記号が指定された状態量は、現時点(k)の支配方程式を実行後、内部状態量の従属変数を独立変数に代入して再度推定観測方程式を実行し、次の標準化時期(k+1)の状態量を推定する。この推定観測量が、本論文で提案するモデル化手法で非線形要素をモデル化するために必要な概念の一つである。詳しくは、摩擦の事例でその用法を提示する。

(b) 論理演算子

スイッチ要素に使用する論理演算子については、後で詳しく説明する。本論文では、スイッチ演算子を総称してスイッチ要素と呼ぶ。

(5) 非線形演算子

非線形演算子は、機能モデルに組み込む機構モデルのモデル化を行うための記号で、主に観測量又は操作量の変換に使用する。

【0359】

(a) 絶対値

状態量・操作量の符号を除いた絶対値を取り出す。数学モデルでは、 $b1abs(A)$ などの表現で記述する。

【0360】

(b) 符号

状態量・操作量から正負(±)の符号を取り出す。数学モデルでは、 $b=sign(a)$ などの表現で記述する。

【0361】

(c) 2乗

状態量・操作量を2乗した値の操作量を生成する。この記号は、2章の図40で示す2個以上の入力を乗算する記号と同じで、1入出力のときは2乗記号となる。

【0362】

(d) 初期化 (積分)

初期化は、条件判定またはスイッチ要素を介して積分記号の値を初期化する。初期化の実行時期は、機構モデルやスイッチ要素を実行する前に行うが、実行後に行う場合もある。代表的な初期化の方法を、図 6 2 に示す。同図は、(a) の条件が不成立の時に積分値  $x$  を 0 にリセット、(b) の条件が成立した時に積分値  $x$  を  $B$  に初期化、(c) の条件が不成立の時に積分値  $x$  を  $B$  に初期化する方法である。これらの数学モデルは、以下のようになる。

【0 3 6 3】

【数 9 7】

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } (A \neq 0) \text{ then } (\cdots\cdots) \text{ else } (x = 0) \\ \text{if } (A = 0) \text{ then } (S_{wA} = 1, x = B) \\ \text{if } (A \neq 0) \text{ then } (S_{wA} = 1) \text{ else } (S_{wA} = 0, x = B) \end{array} \right\} \quad (97)$$

【0 3 6 4】

初期化のモデルには、積分記号と (a) の条件判定又は (b) ・ (c) のスイッチ記号の間に、条件判定で操作できない加算記号などのモデルを組み込んではいない。

【0 3 6 5】

(e) 条件判定

条件判定は、図 6 1 で示す推定観測量の記号で観測された次の標準化時期の観測量や、機構モデル内で生成された操作量からスイッチ要素の操作量を生成する記号で、条件判定式には、大小関係・等値関係・論理演算などの演算子を使用する。演算結果は、成立したとき 1 (true) を不成立のとき 0 (false) の操作量を出力する。この場合の操作量又は代入量を示す白抜きの矢印には、操作変数名がつけられる。また、本論文では、条件判定の数学モデルを、C 言語など一般的に使用されている IF 文で記述する。

(6) 関数式

状態量・操作量の関数値を操作量として取り出す指定を行う。例えば関数名  $\sin()$  の枠内に  $A$  を入力し  $B$  を出力する指定は、 $B = \sin(A)$  の数学モデルを意味する。

#### (7) 操作

モデルを外部から操作する信号を生成する。例えば、スイッチの操作などがある。

#### (8) ON-OFF スイッチ

一般的な ON-OFF スイッチの働きを、電気系で使用される接点式開閉器と対応させて示すと、図 6 3 になる。

【0 3 6 6】

同図の左側 (a) に示す NO スイッチ (Normal Open Switch) は常時 OFF のスイッチで、右 (b) に示す NC スイッチ (Normal Close Switch) は常時 ON のスイッチである。図 6 3 (a) の NO スイッチ要素の数学モデルは、次のようになる。

【0 3 6 7】

【数 9 8】

$$\left. \begin{aligned} & f(O_P) \text{ then } (S_{WON} = 0) \text{ else } (S_{WON} = 1) \\ & I_o = I_i S_{WON} \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

【0 3 6 8】

図 6 3 (b) の NC スイッチ要素の数学モデルは、次のようになる。

【0 3 6 9】

【数 9 9】

$$\left. \begin{aligned} & f(O_P) \text{ then } (S_{WOFF} = 1) \text{ else } (S_{WOFF} = 0) \\ & I_o = I_i S_{WOFF} \end{aligned} \right\} \quad (99)$$

【0370】

式(98)と(99)の上側が条件判定式、下側が状態量进行操作するスイッチ要素の式である。式(98)のNOスイッチは、条件判定式 $O_P$ が成立した時スイッチ要素 $S_{WON}$ が1になりONにする。成立しない時は $S_{WON}$ が0になりOFFにする。また、式(99)のNCスイッチは、式(98)とは逆に条件判定式 $O_P$ が不成立の時 $S_{WOFF}$ が1になってスイッチONにし、成立した時 $S_{WON}$ が0になりスイッチOFFにする。

#### (7) 論理積・論理和

論理積(AND)と論理和(OR)は、ファジー演算のMini-Max法の論理積と論理和に対応する論理演算である。論理積は、入力された状態量の最小値を選択して出力する機能をもつ記号で、図64と図65が2入力論理積と論理和をスイッチ要素と対比して表した例である。

【0371】

図65において、論理積の内部には出力を共通にするNOスイッチ要素群と其中的最小状態量を選択する条件判定を持ち、論理和は最大状態量を選択する条件判定を持つ。両者は、条件判定の判定式以外、同一モデルである。

【0372】

図64(b)の論理積の数学モデルは、次のようになる。

【0373】

【数100】

$if(I_A < I_B) \text{ then } (S_{W\_0} = 0, S_{W\_1} = 1) \text{ else } (S_{W\_0} = 1, S_{W\_1} = 0)$

$$I_o = I_A S_{W\_1} + I_B S_{W\_0}$$

(100)

【0374】

図65(b)の論理和の数学モデルは、次のようになる。

【0375】



【数 101】

$if(I_A > I_B) then (S_{W\_0} = 0, S_{W\_1} = 1) else (S_{W\_0} = 1, S_{W\_1} = 0)$

$$I_o = I_A S_{W\_1} + I_B S_{W\_0}$$

(101)

【0376】

## 2. 線形モデルの基本機能要素

### (1) 状態量

状態量は、次の流動量と位差量に分けることができる。

①位差量とは、電圧・速度・流速などのエネルギーを運ぶ媒質の移動量や多さを表す状態量を指す。

②流動量とは、電流・力・流体圧力などの単位量の媒質が有するエネルギーの強さや量を表す状態量を指す。

【0377】

この流動量と位差量は、その対がエネルギーとなる組み合わせで使用する。例えば、電圧と電流の積が電力になり、速度と力の積が仕事率になることをモデル化に利用する。このことは、機能モデルの根幹がエネルギー原理にあり、系のモデルを位差量と流動量で表し、両者に関係する物理法則がモデル上で全て表せることを意味する。

【0378】

この位差・流動量は、その積分値をエネルギーの多さや強さの蓄積量とし、例えば機械系の移動位置と力積などに対応する。更に、熱力学のエントロピーを構成する内部エネルギーとして、気体の圧縮や抵抗損失などの熱エネルギー関係する温度なども蓄積量となる。ここでは、これらを総称して蓄積状態量呼ぶ。また、位差量とその蓄積量で接続される系を位差系と呼び、同様に流動量の系を流動系と呼び、両者は互いに双対関係となる。この両系は、機械や電気理論の根幹であり、機械工学では流動系の力（圧力）を基本にして位差系の速度またはその積分量の距離（位置）を結果として扱い、電気工学では位差系の電圧を基本にして流動系の電流を結果として扱う理論体系と見ることができる。本論文で述べるモ

デル化手法は、この位差・流動系を等価に扱い両者間の双対性を利用して、各工学分野の理論や法則を相互乗り入れして垣根を取り払う手法となっている。

## (2) パラメータ

### (a) 特性

特性は、流動量と位差量を関係付けるものであり、系の性質を表す。エネルギーを蓄積する蓄積特性と電気抵抗や粘性減衰のようにエネルギー損失を伴う損失特性の2種類に分けられる。また、この特性は、位差量と流動量の積で表すエネルギー（運動エネルギー）を生成し、同時に内部に生成された熱や位置などのエネルギーを生成する。この内部エネルギーは、温度や距離に変換して出力状態量に持たすことができる。尚、多次元空間で置かれる特性は、内部に作用方向を指定する座標情報を持つ。

#### 【0379】

①蓄積特性は、インダクタンスやばねこわさのように、流動量の変化をエネルギーとして蓄え位差量に変えるものと、電気容量や質量のように位差量の変化をエネルギーとして蓄え流動量に変えるものに分けられる。

#### 【0380】

②損失特性は、電気容量の漏洩抵抗や流体による粘性抵抗のように位差量に依存する損失を流動量に変えるものと、電気抵抗や材料圧縮による内部減衰のように流動量に依存する損失を位差量に変えるものに分けられる。

#### 【0381】

### (b) 係数

係数とは、流動量同士または位差量同士を関係付ける数や量のことで、次の4種類に分けられる。

#### 【0382】

①変圧器巻数比や歯車比のように、同一の物理単位系同志を関係付ける無単位量。尚、数学モデル上に表れる値が1の係数の場合、要素間の直結を意味する。

#### 【0383】

②モータのトルク定数と速度定数・タイヤ半径・ピストン断面積など、異なる物理単位系同志を関係付ける有単位量。また、タイヤの回転と並進運動のように

異なる物理単位系が直交する場合は、物理係数に座標変換の機能を必要とする。

【 0 3 8 4 】

③多次元座標空間で運動するリンク機構や車の運動などの状態量の座標系を変換する無単位量。

【 0 3 8 5 】

④損失率や制御系のゲインのように、対となる位差量または流動量の片側に係数を掛けてエネルギーの増減を伴う無単位量。

【 0 3 8 6 】

上記①～③の係数は、対となる位差量と流動量の双方に同一係数を掛け、エネルギーの増減を伴わないように変換する。この位差量と流動量に共通の意味を持つ係数を適用する変換係数の概念は、機能モデルの特長の一つであり、この概念が物理単位系を超えたモデル化、および同じモデル内に異なる物理単位系を同居させることを可能にする理由の一つである。また、蓄積特性や損失特性に対し、この係数は 2 乗で作用する重み係数の働きを持っている。

【 0 3 8 7 】

#### (c) スイッチ要素

スイッチ要素とは、機能モデル内部の状態量を接続・開放する論理要素で、これが組み込まれた機能モデルは、モデル構造を変化させる非線形モデルとなる。この要素の係数値は、1 ( t r u e ) と 0 ( f a l s e ) または  $1 \cdot 0 \cdot -1$  の無単位量で状態量を断続する特殊用法の係数と考えることができる。

#### (d) 側負荷

側負荷とは、モデル内部で状態量の生成または吸収する働きをし、位差量と流動量に対応した 2 種類がある。この側負荷は、対にならない単独の位差量または流動量を全て側負荷とし、系内部から未拘束の状態量を排除する意味を持っている。

【 0 3 8 8 】

①電池の内部電圧・ダーオードの電圧降下・機器の周囲温度のように、位差量に対応したもの

②摩擦トルク・クラッチの伝達トルク・一定の電流を供給する電流源のように

、流動量に対応したもの

③側負荷の働きは、電池の内部電圧のように状態量を生成する発生源と、摩擦トルクのように状態量を吸収する吸収源に分かれる。この両者はモデルに組み込まれることで生成または吸収の働きがきまる。

【 0 3 8 9 】

④特殊な用途として、運転者などの操作や指示を信号として表す場合がある。

### (3) 基本機能要素

図 6 0 の記号と状態量の構成概念を組み合わせた、代表的な基本機能要素の例を図 6 6 に示す。同図は、位差量を流動量に変換する基本的な要素を表し、この基本機能要素に対し流動量を位差量に変換する基本機能要素が対になる。また、(a) 蓄積要素が他の基本要素に対し流動量と位差量の流れが逆になっているのは、本来蓄積特性の定義は微分形であるが機能モデル上では双対関係にある積分形で表現するためである。また、状態量の媒質を包含する熱力学や流体などのモデルでは、これらの媒質変化と加算・分配点における媒質処理も必要となる。

【 0 3 9 0 】

ここで、基本機能要素は、以下のように分類される。

【 0 3 9 1 】

- (a) 位差蓄積要素 (図 6 6 (a))
- (b) 流動蓄積要素 (図 6 6 (a) の双対形)
- (c) 位差損失要素 (図 6 6 (b))
- (d) 流動損失要素 (図 6 6 (b) の双対形)
- (e) 位差伝達要素 (図 6 6 (c))
- (f) 流動伝達要素 (図 6 6 (c) の双対形)
- (g) 状態係数 (図 6 6 (d) の N が無単位量)
- (h) 物理係数 (図 6 6 (d) の N が有単位量)
- (i) 座標係数 (図 6 0)
- (j) 増減率
- (k) 流動供給要素 (図 6 6 (e))
- (l) 位差供給要素 (図 6 6 (e) の双対形)

(m) 位差合流要素 (図 6 6 (f))

(n) 流動合流要素 (図 6 6 (f) の双対形)

【0 3 9 2】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いをモデル化して再現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【図 2】

本発明の第 2 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【図 3】

本発明の第 3 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【図 4】

本発明の第 4 の非線形特性再現装置のブロック線図である。

【図 5】

本発明の第 4 の非線形特性再現装置の判定状態を示す図である。

【図 6】

本発明の第 5 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【図 7】

本発明の第 6 の非線形特性再現装置の原理説明図である。

【図 8】

走行抵抗の機能・機構モデルを示す図である。

【図 9】

動摩擦力と走行抵抗の機能・機構モデルを示す図である。

【図 1 0】

走行抵抗の機能モデルを示す図である。

【図 1 1】

機構モデルの階層化（包含関係）を示す図である。

【図 1 2】

空気圧シリンダーの構造モデルを示す図である。

【図 1 3】

空気圧シリンダーの機能モデルを示す図である。

【図 1 4】

空気圧シリンダーのシミュレーション結果を示す図である。

【図 1 5】

空気圧シリンダーの  $P-V$ ・ $v-V$  線図を示す図である。

【図 1 6】

がたの構造モデルを示す図である。

【図 1 7】

がたの機能・機構モデルを示す図である。

【図 1 8】

衝撃吸収用ダンパーの構造モデルを示す図である。

【図 1 9】

衝撃吸収用ダンパーの機能・機構モデルを示す図である。

【図 2 0】

衝撃吸収用ダンパーのシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 1】

ゼネバ機構の構造モデルを示す図である。

【図 2 2】

ゼネバ機構の機能・機構モデルを示す図である。

【図 2 3】

ゼネバ機構のシミュレーション結果（その 1）を示す図である。

【図 2 4】

ゼネバ機構のシミュレーション結果（その 2）を示す図である。

【図 2 5】

摩擦の構造モデルを示す図である。

【図 2 6】

摩擦の機能モデルを示す図である。

【図 2 7】

摩擦のシミュレーション結果を示す図である。

【図 2 8】

巻線温度上昇の機能モデルを示す図である。

【図 2 9】

巻線温度上昇のシミュレーション結果を示す図である。

【図 3 0】

残量警告灯の構成を示す図である。

【図 3 1】

残量警告灯の電気回路を示す図である。

【図 3 2】

抵抗変化による無接点スイッチの特性を示す図である。

【図 3 3】

残量警告灯の機能モデルを示す図である。

【図 3 4】

残量警告灯の機能モデルを示す図である。

【図 3 5】

警告灯の電圧－電流特性モデルを示す図である。

【図 3 6】

サーミスタの外観形状を示す図である。

【図 3 7】

サーミスタの機構モデルを示す図である。

【図 3 8】

残量警告灯のステップ応答特性を示す図である。

【図 3 9】

液面揺動の応答特性を示す図である。

【図 4 0】

揺動機構の構造モデルを示す図である。

【図 4 1】

揺動機構の機能モデルを示す図である。

【図 4 2】

揺動機構の機能モデルを示す図である。

【図 4 3】

揺動機構のシミュレーション結果を示す図である。

【図 4 4】

非線形伝達係数  $\Phi_b$  の角度特性を示す図である。

【図 4 5】

流動蓄積要素の非線形パラメーターを示す図である。

【図 4 6】

円錐バネの構造と荷重特性を示す図である。

【図 4 7】

円錐バネの機能モデルを示す図である。

【図 4 8】

可変慣性モーメントの構造モデルを示す図である。

【図 4 9】

可変慣性モーメントの機能・機構モデルを示す図である。

【図 5 0】

可変慣性モーメントのシミュレーション結果を示す図である。

【図 5 1】

クラッチの構造モデルを示す図である。

【図 5 2】

クラッチのトルク伝達特性を示す図である。

【図 5 3】

クラッチ機能・機構モデルを示す図である。

【図 5 4】

シミュレーション用のクラッチモデルを示す図である。

【図 5 5】



クラッチのシミュレーション結果を示す図である。

【図 5 6】

ブレーキの構造モデルを示す図である。

【図 5 7】

ブレーキの機能モデルを示す図である。

【図 5 8】

ブレーキのシミュレーション結果を示す図である。

【図 5 9】

機能・機構モデルの実行順を示す図である。

【図 6 0】

機能モデルの主な記号を示す図である。

【図 6 1】

非線形の記号を示す図である。

【図 6 2】

積分量（記号）の初期化を示す図である。

【図 6 3】

ON-OFF スイッチを示す図である。

【図 6 4】

論理積のモデルを示す図である。

【図 6 5】

論理和のモデルを示す図である。

【図 6 6】

機能モデルの基本要素を示す図である。

【符号の説明】

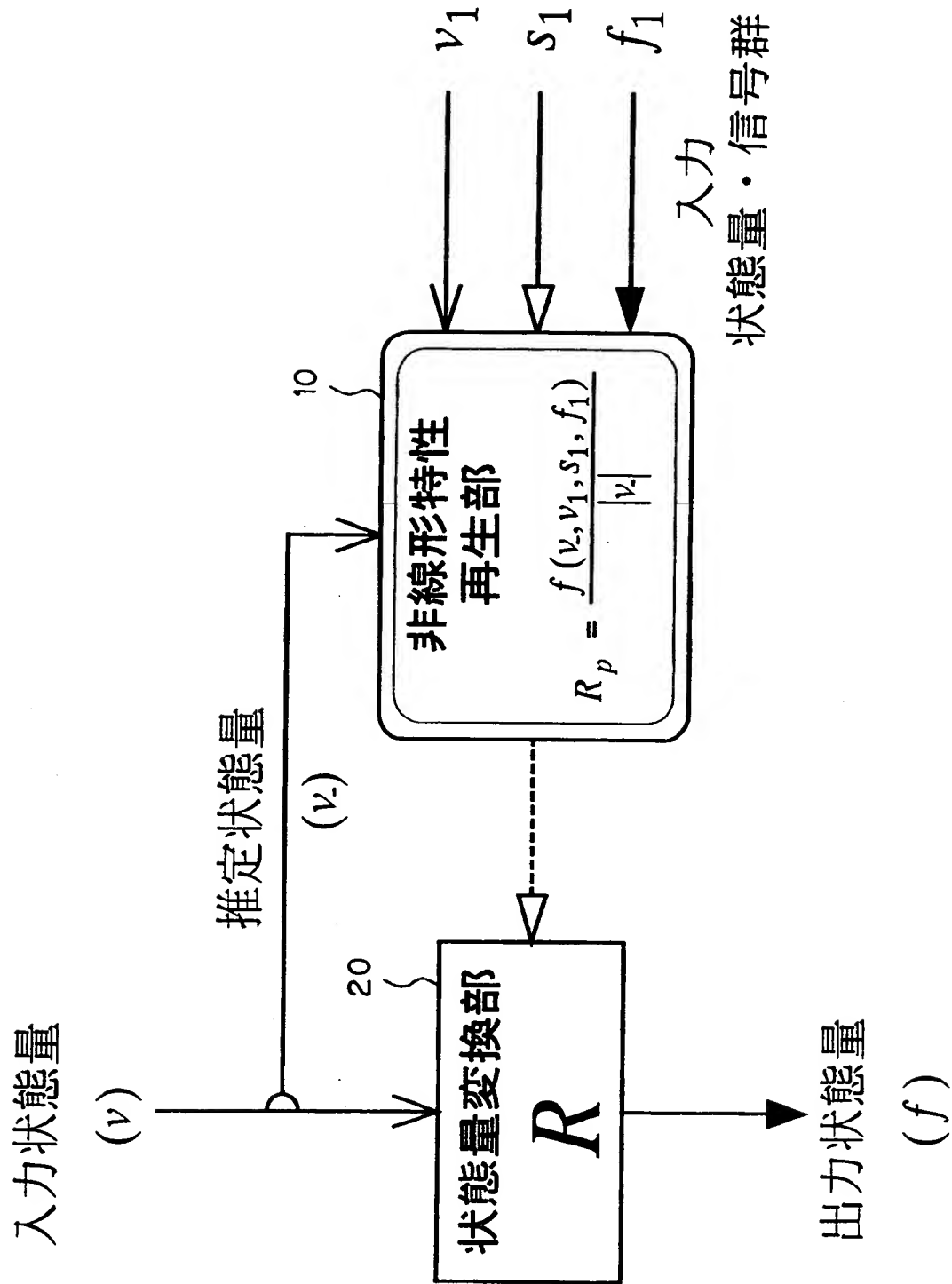
- 1 0 非線形特性再生部
- 2 0 状態量変換部
- 3 0 線形モデル部
- 4 0 非線形モデル部
- 4 1 非線形変換部

- 5 0 論理判定部
- 6 0 状態量切替部
- 7 0 状態変動指定部
- 8 0 状態偏差検出部
- 9 0 安定状態制御部
- 1 0 0 状態量切替部
- 1 1 0 定常値設定部
- 1 2 0 正規化応答部
- 1 3 0 特性生成部
- 1 4 0 状態量変換部
- 1 5 0 記憶装置
- 1 6 0 入力装置
- 1 7 0 表示装置
- 1 8 0 中央演算装置
- 1 9 0 一時記憶装置

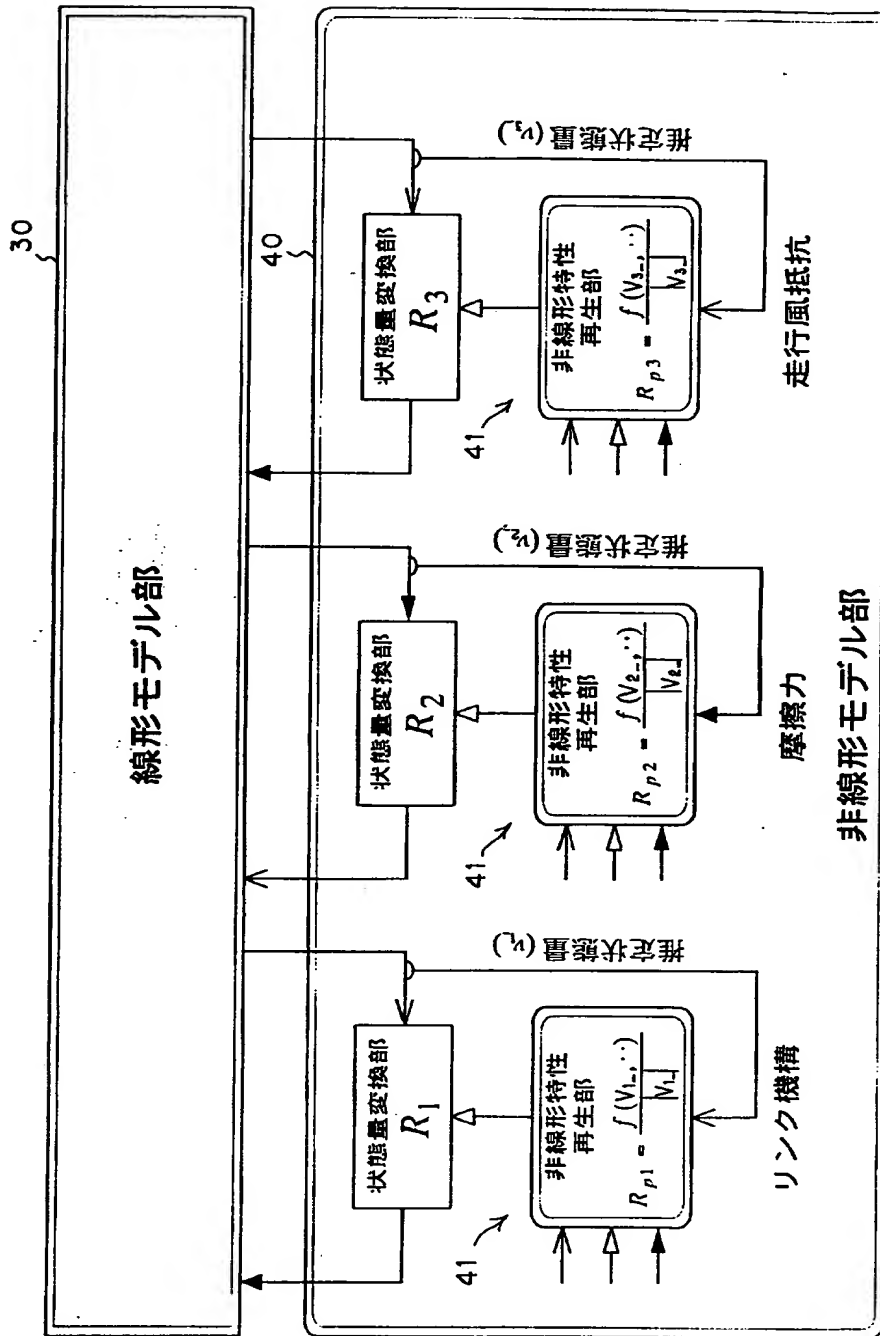
【書類名】

図面

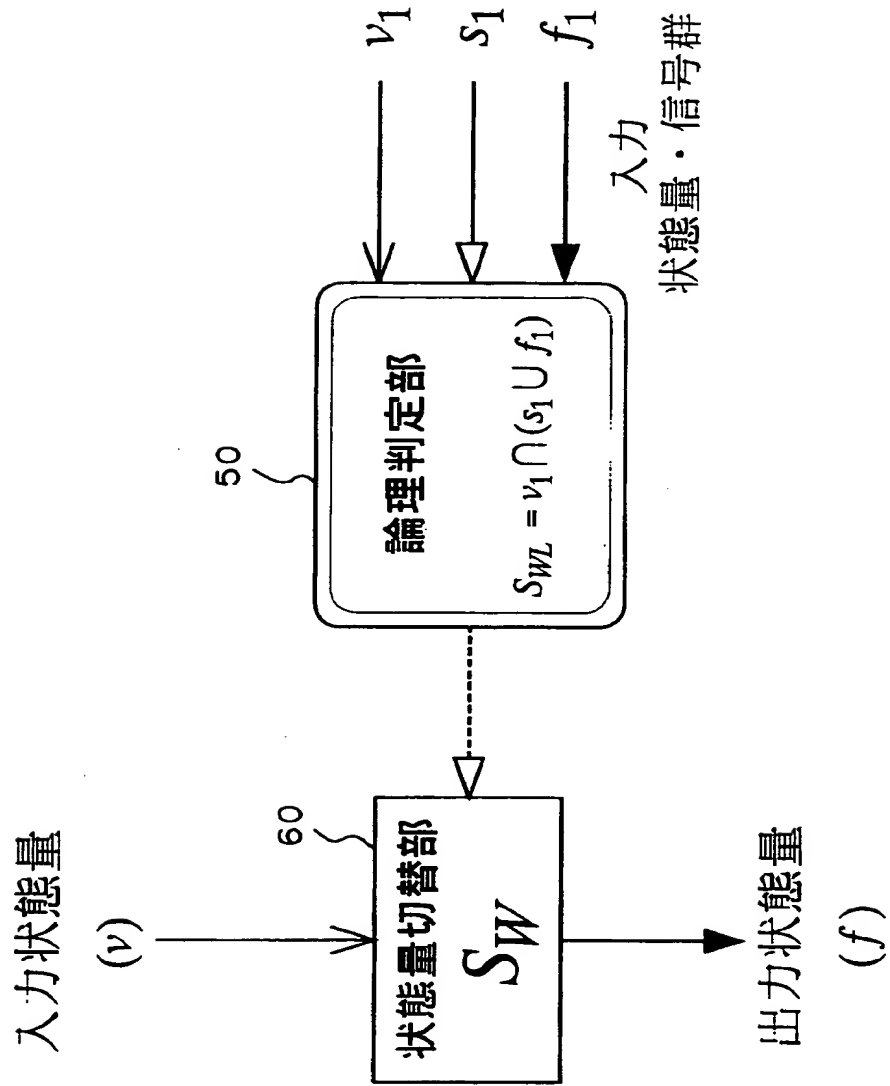
【図 1】



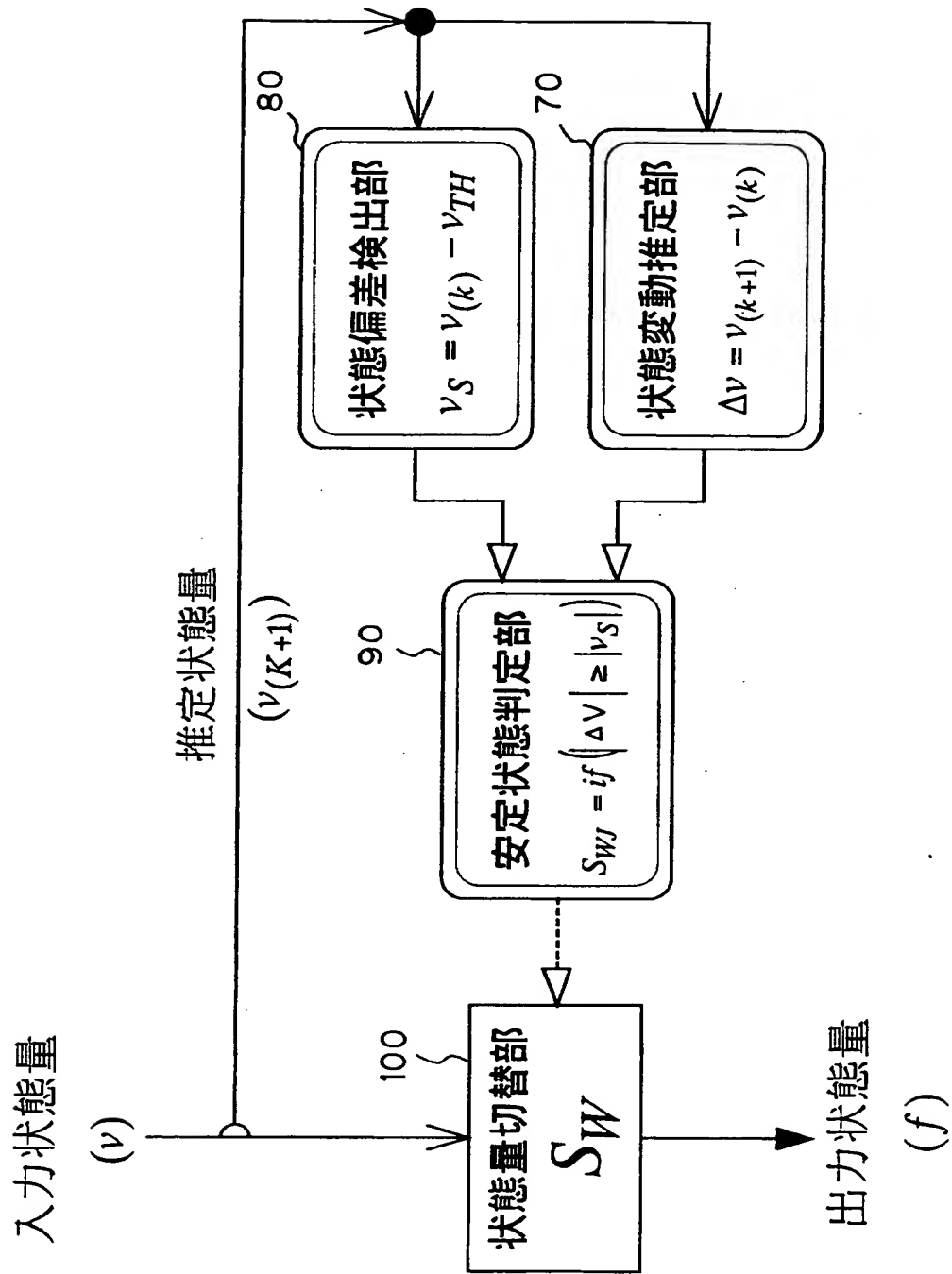
【図 2】



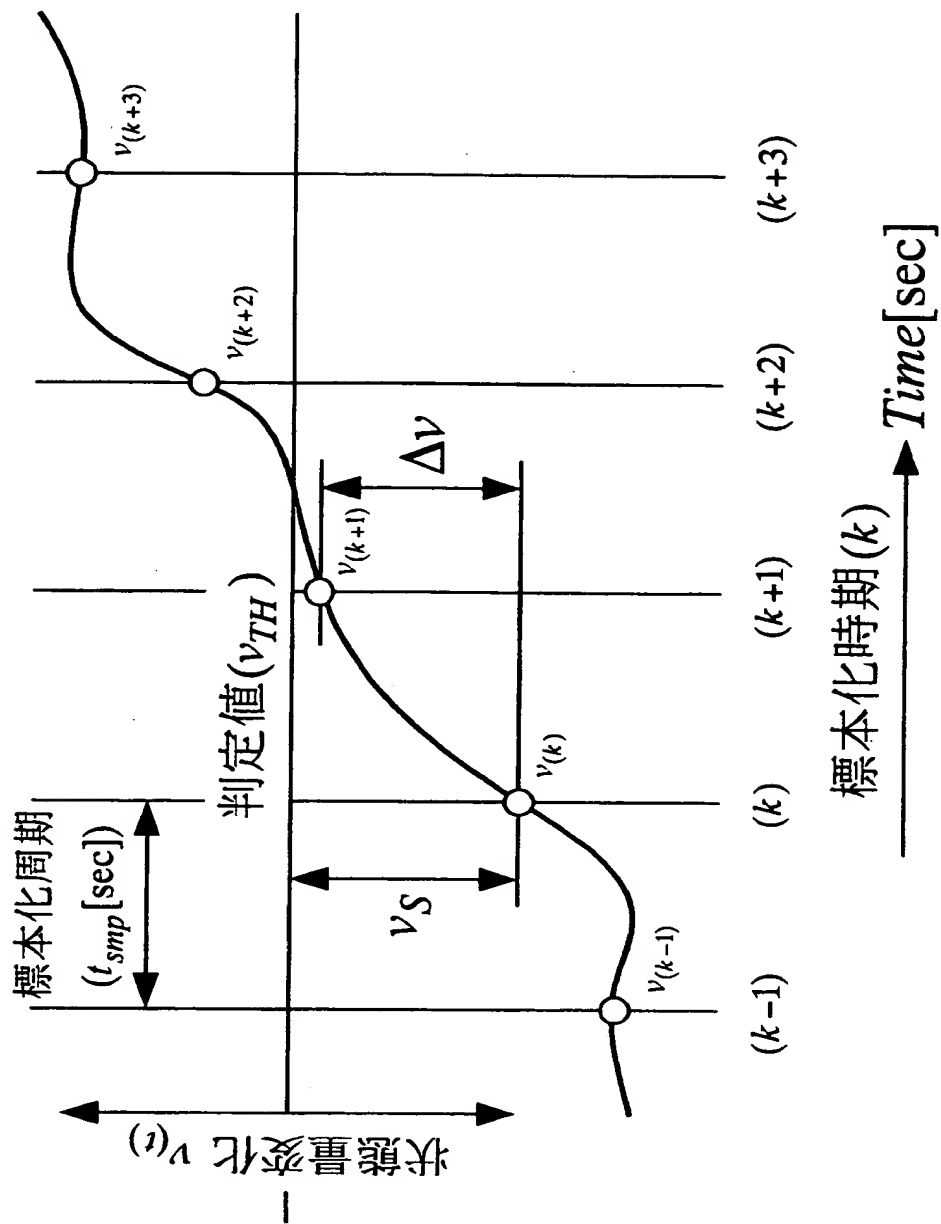
【図 3】



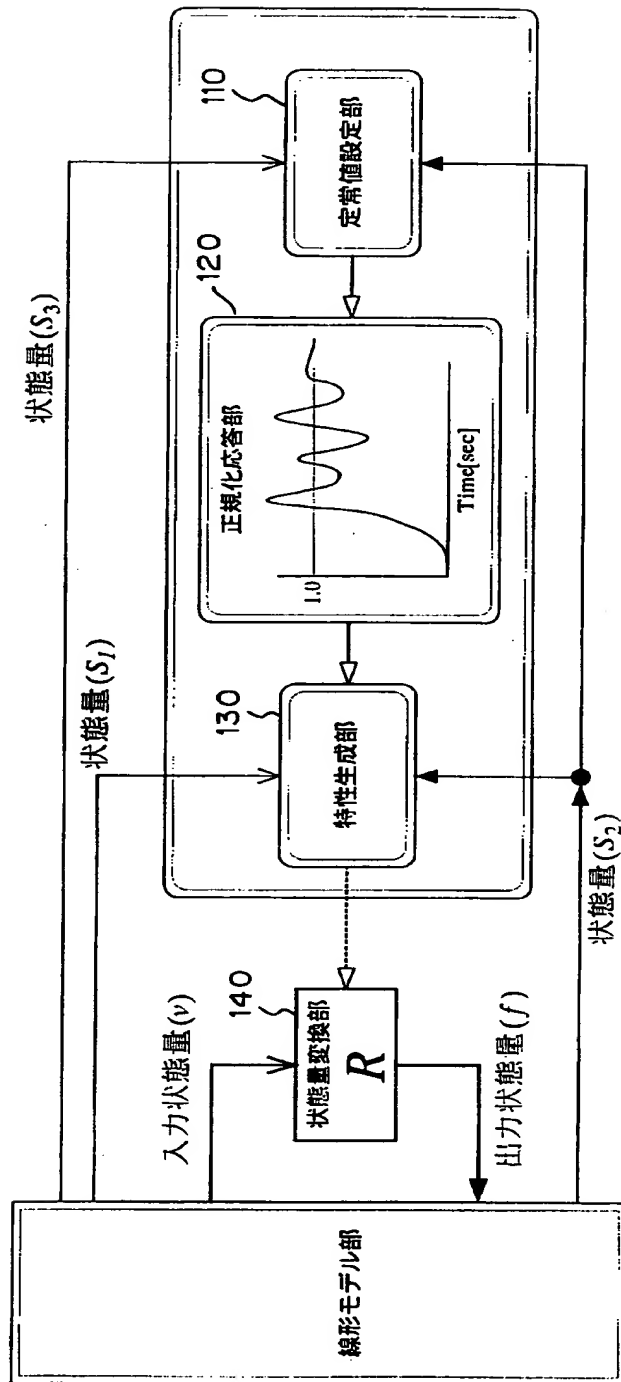
【図 4】



【图 5】

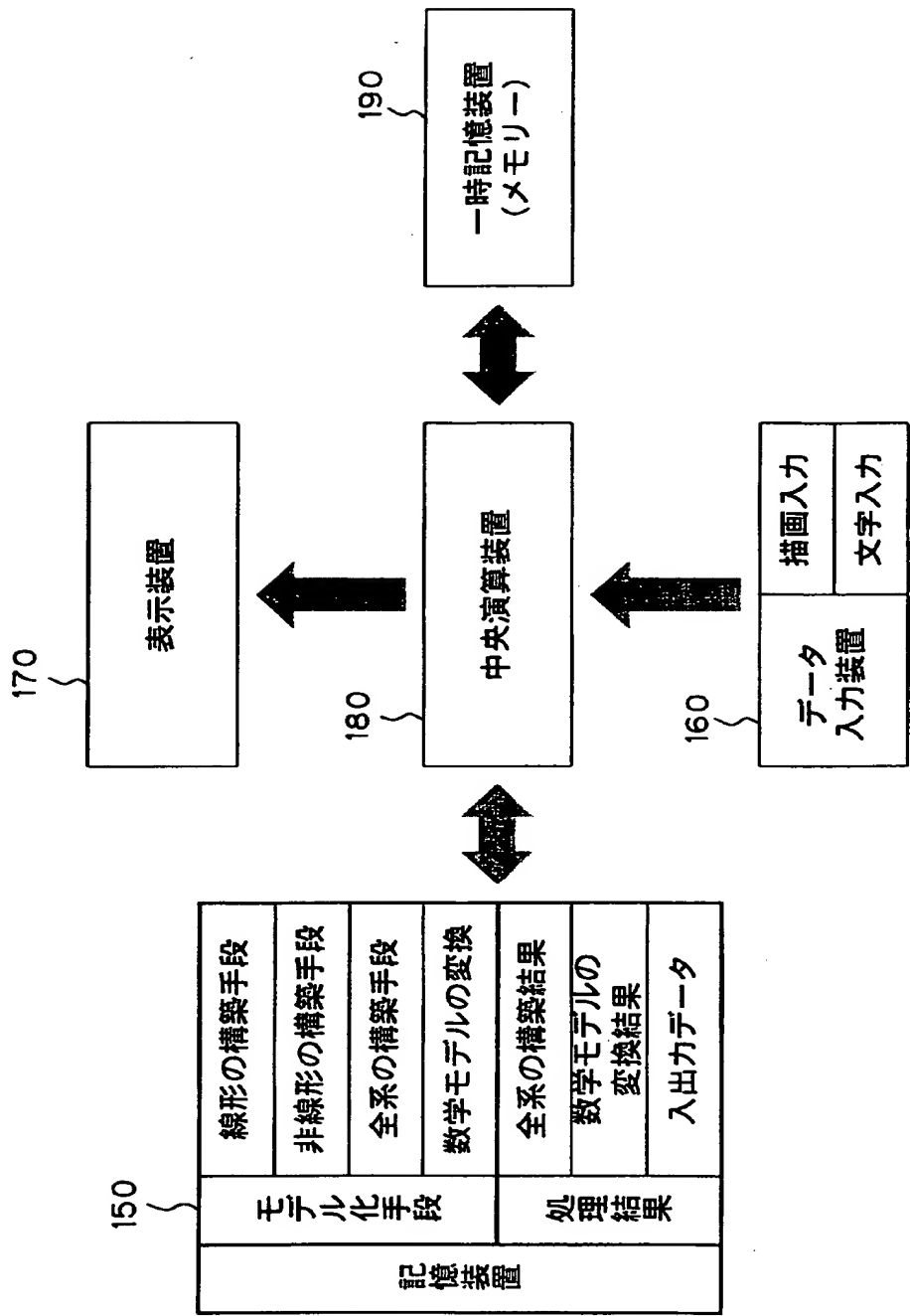


【図 6】

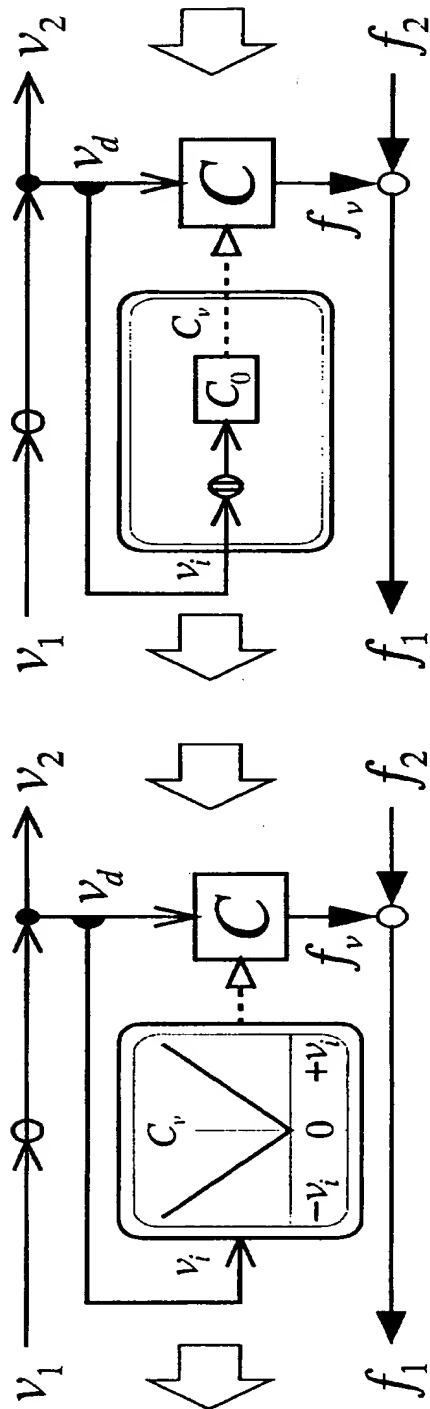




【図 7】



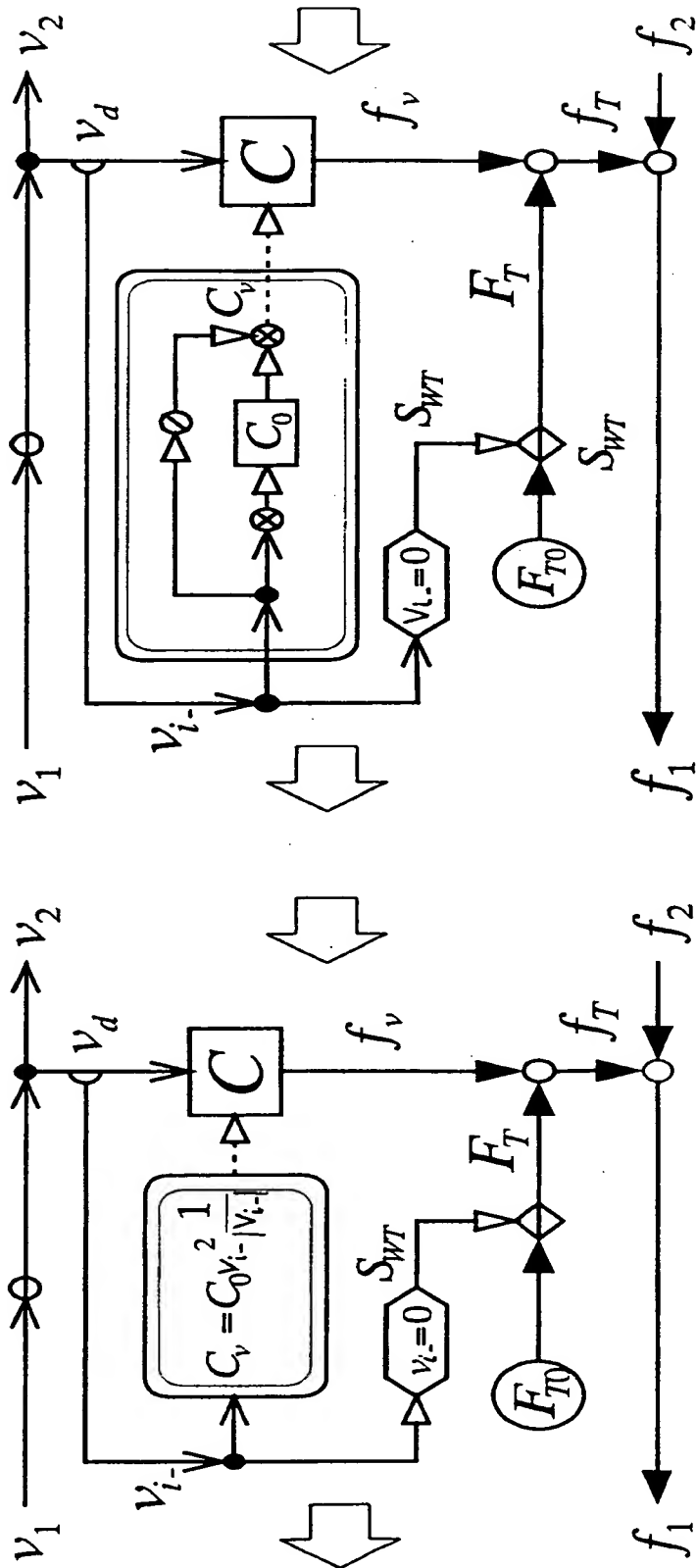
【図 8】



(a) グラフ表現

(b) モデル表現

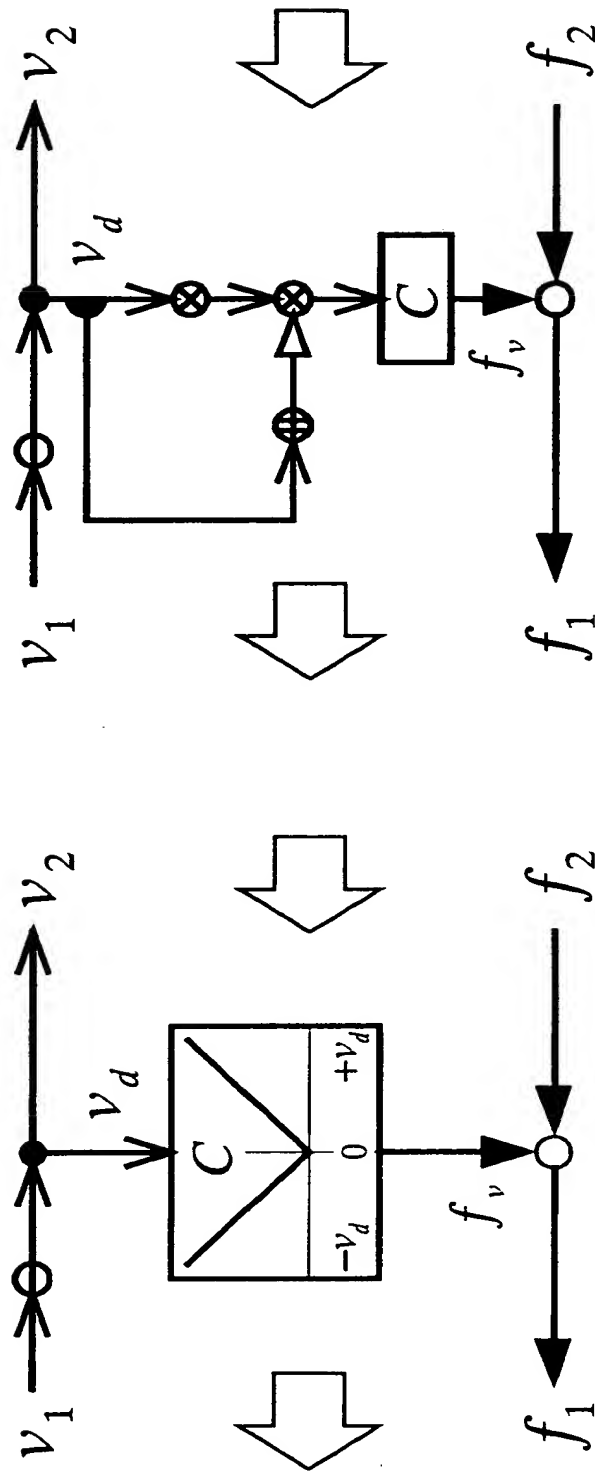
【図 9】



(b) モデル表現

(a) 数式表現

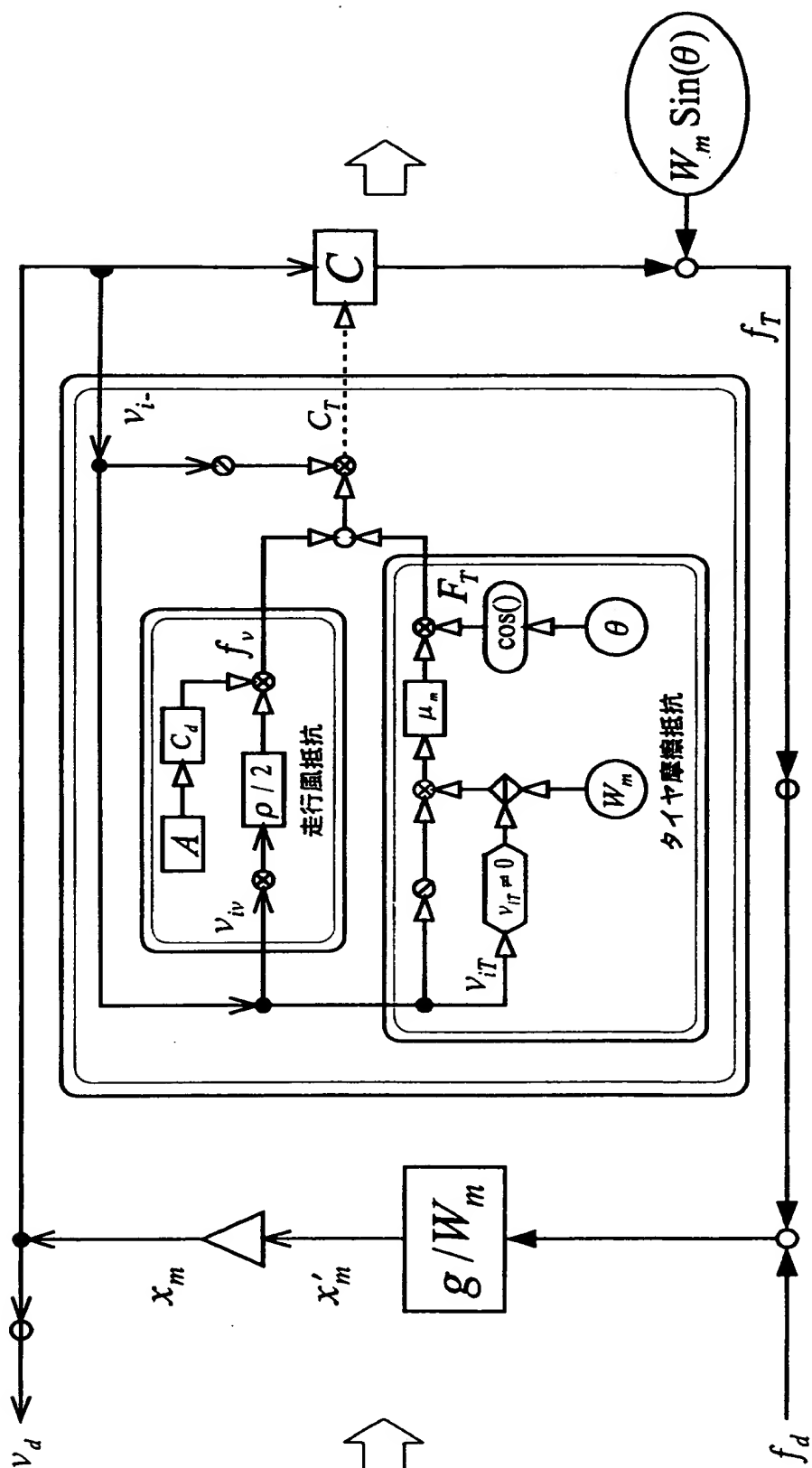
【図 10】



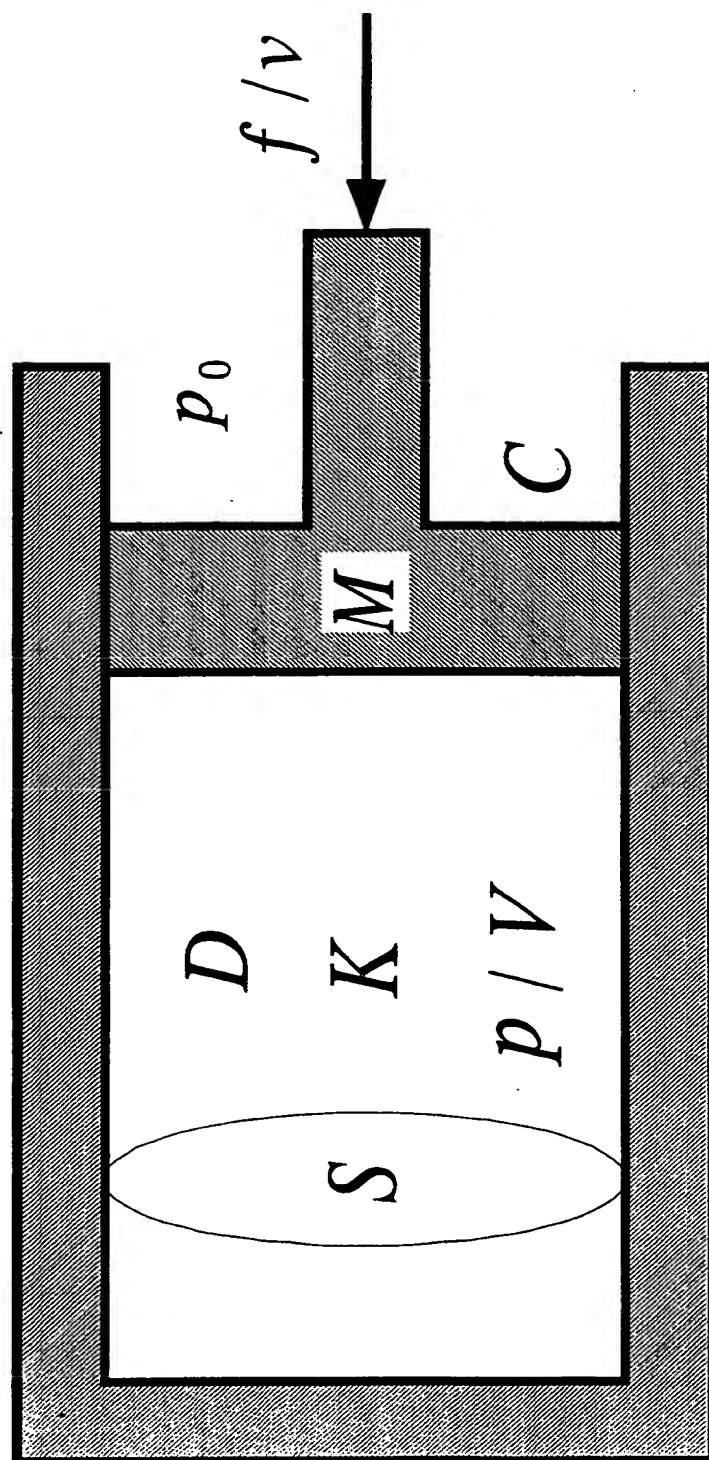
(b) モデル表現

(a) グラフ表現

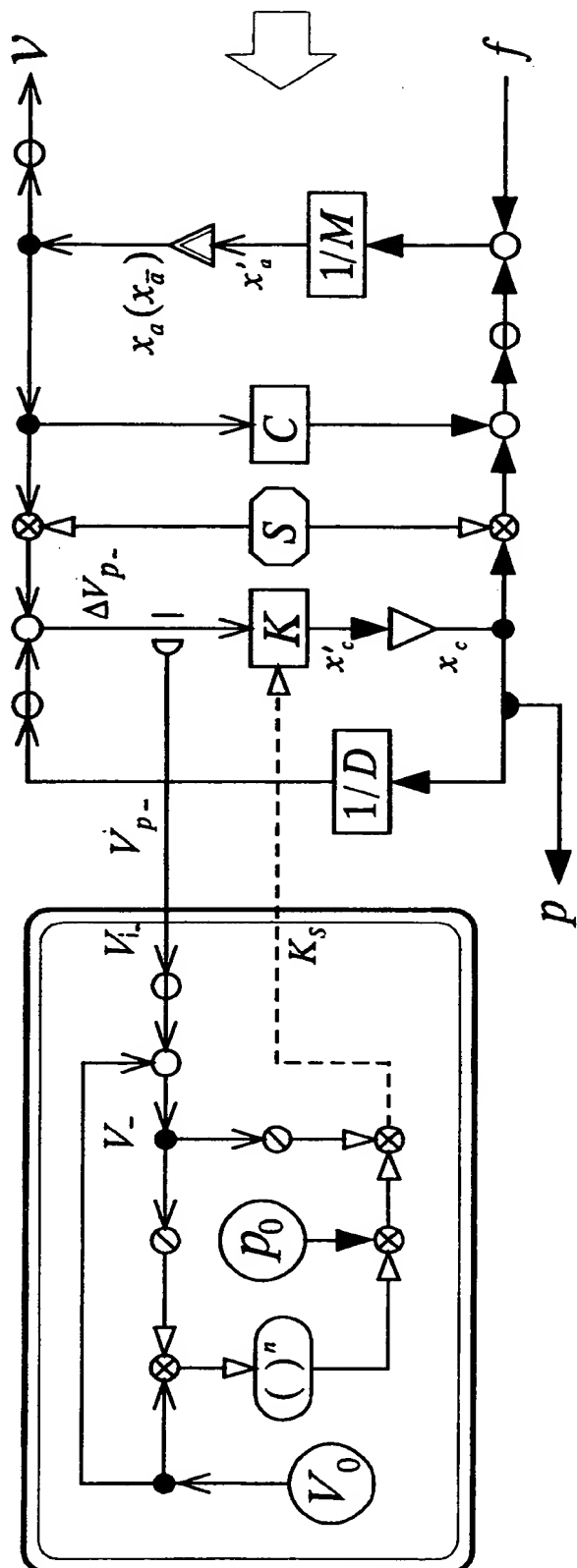
【図 11】



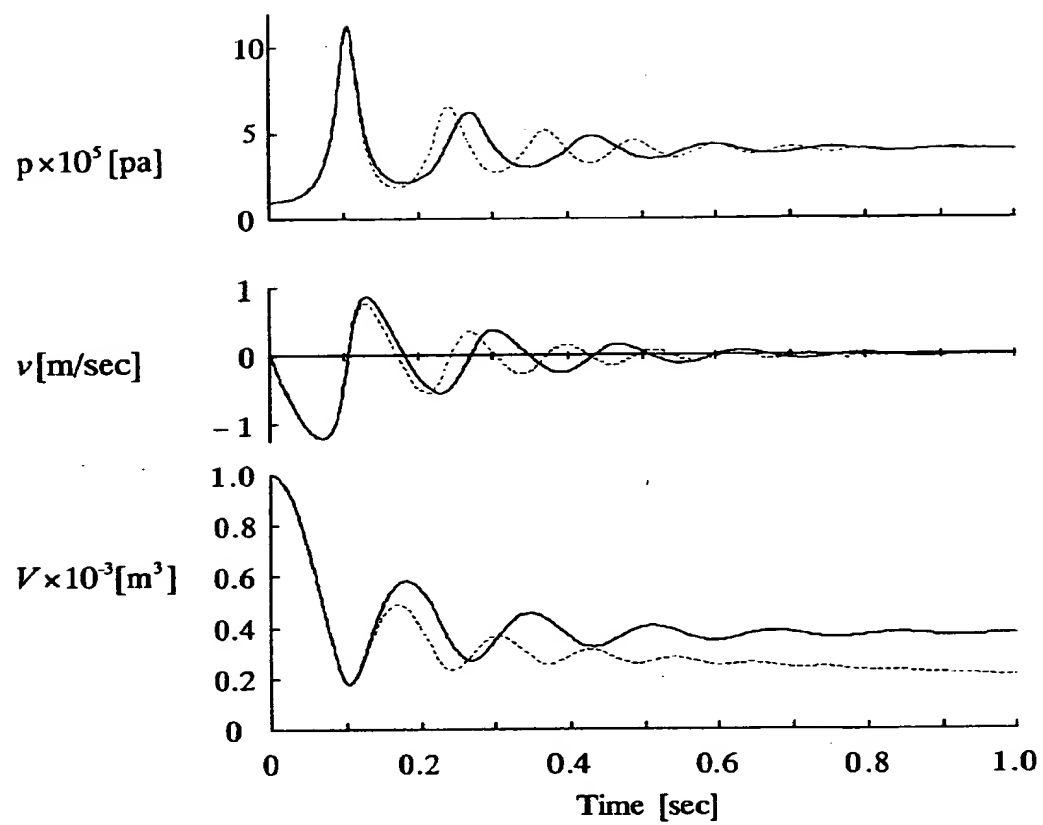
【図 1 2】



【図 1 3】

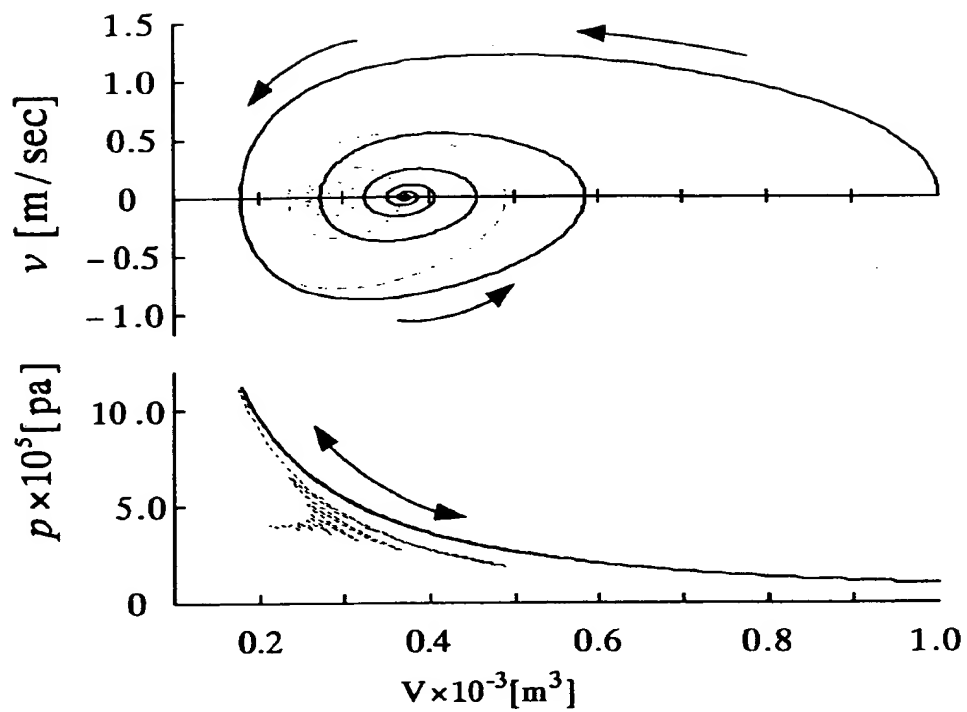


【図 1 4】

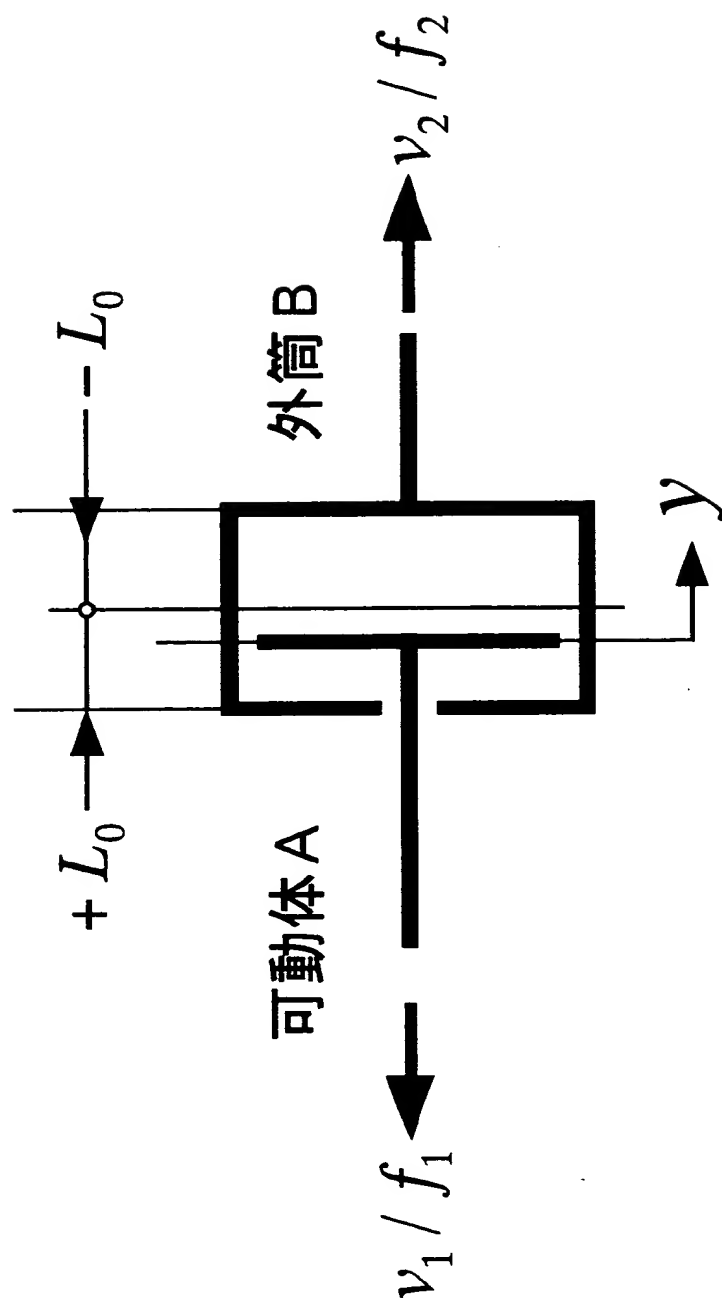




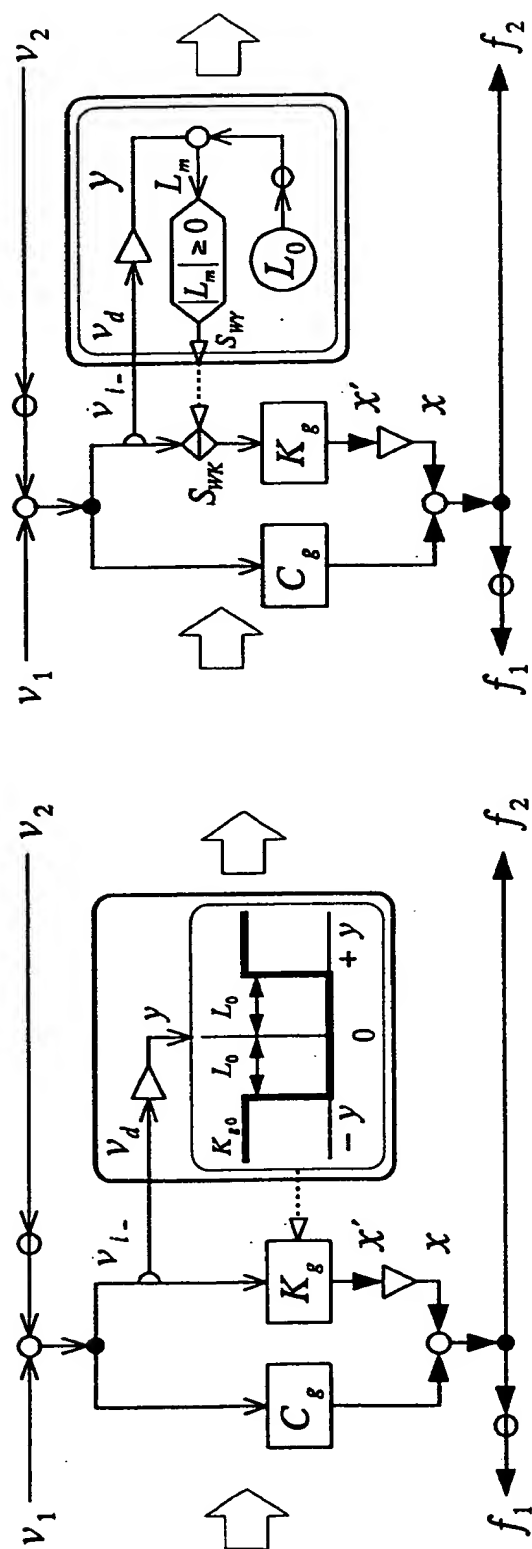
【図 1 5】



【図 1 6】



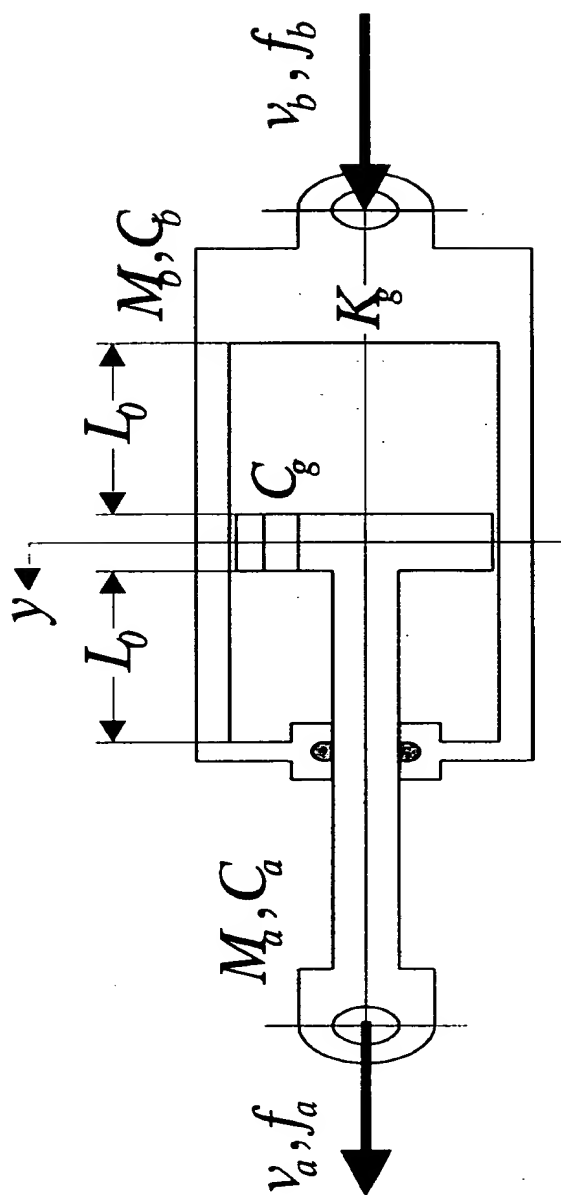
【図 17】



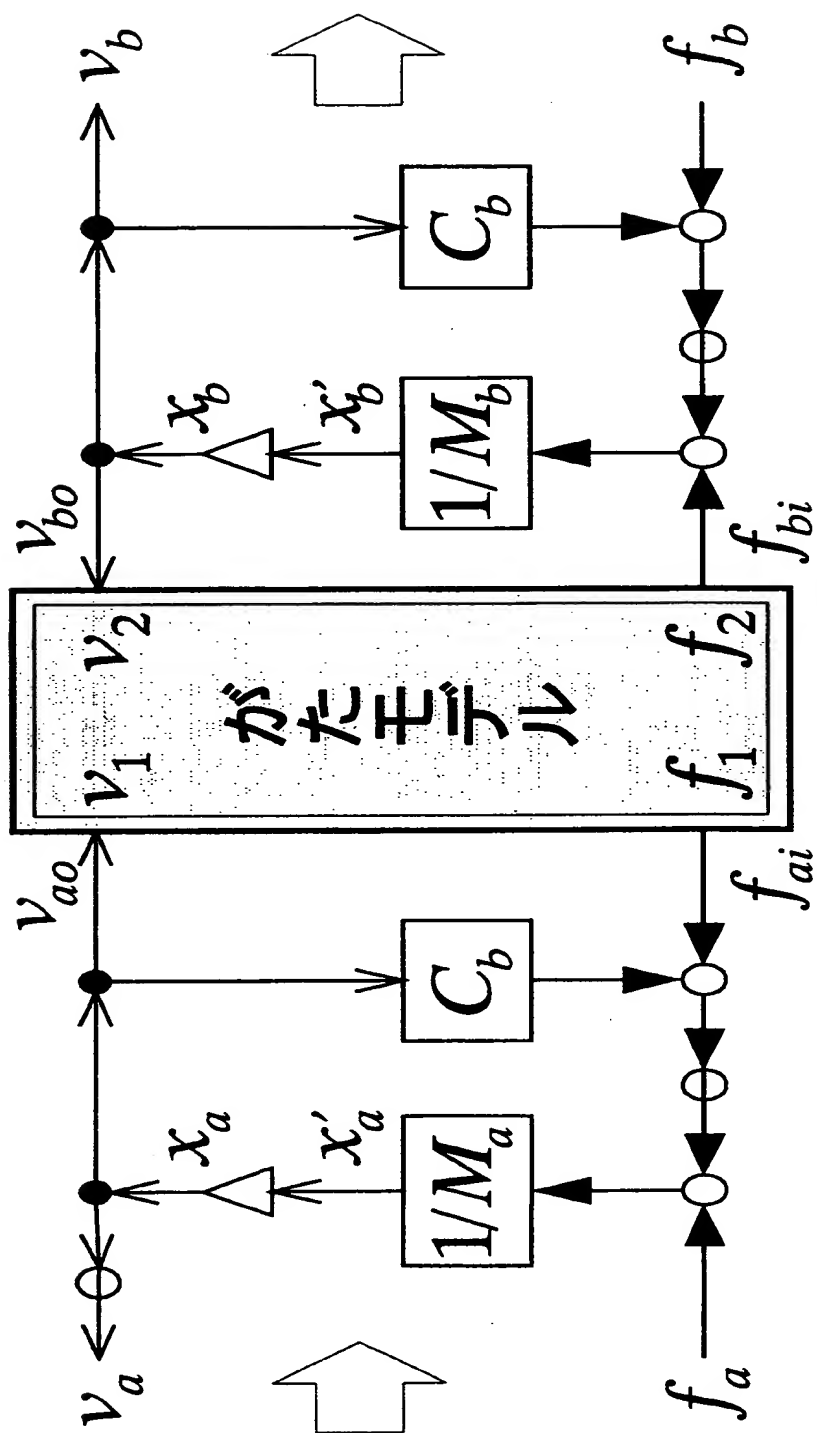
(b) スイッチ要素による表現

(a) 機構モデルによる表現

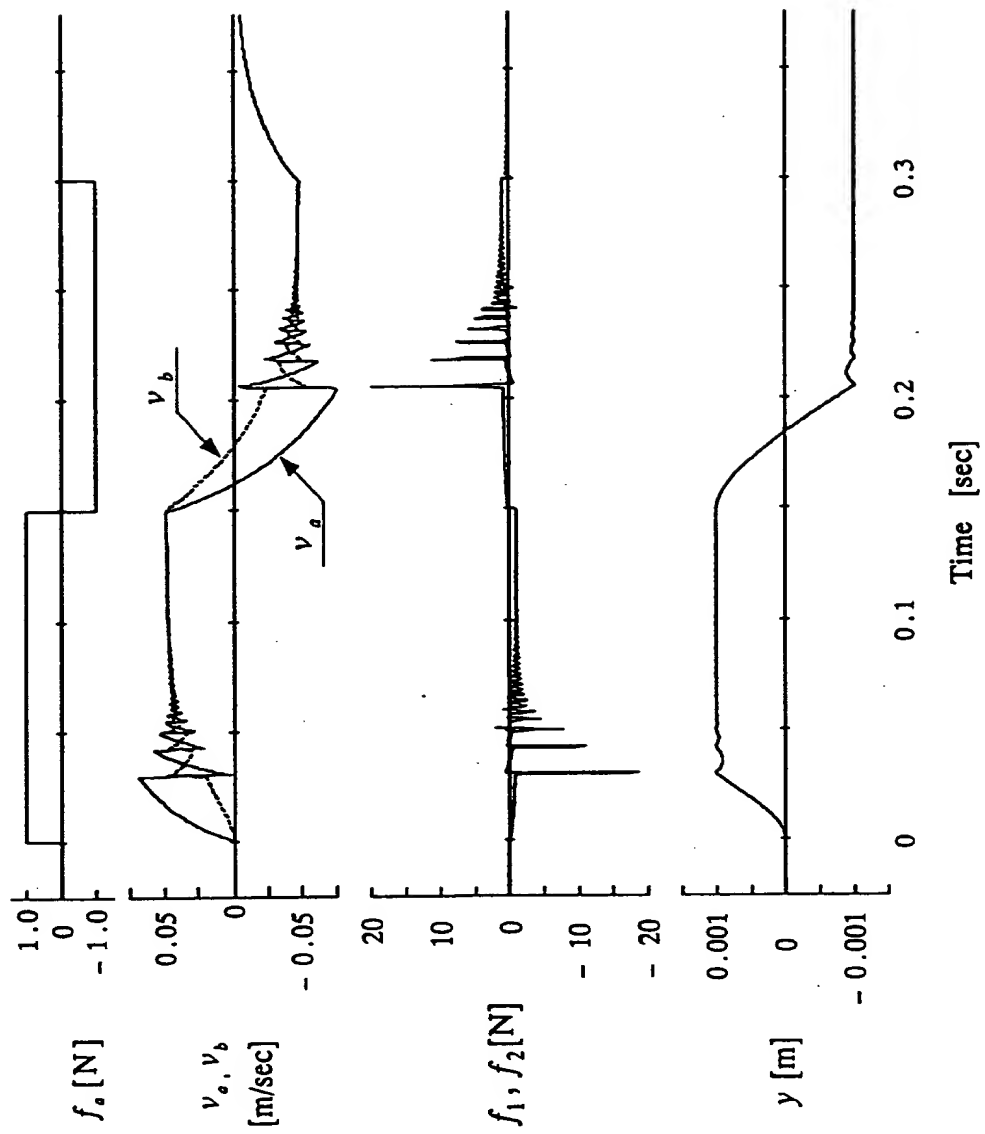
【図 1 8】



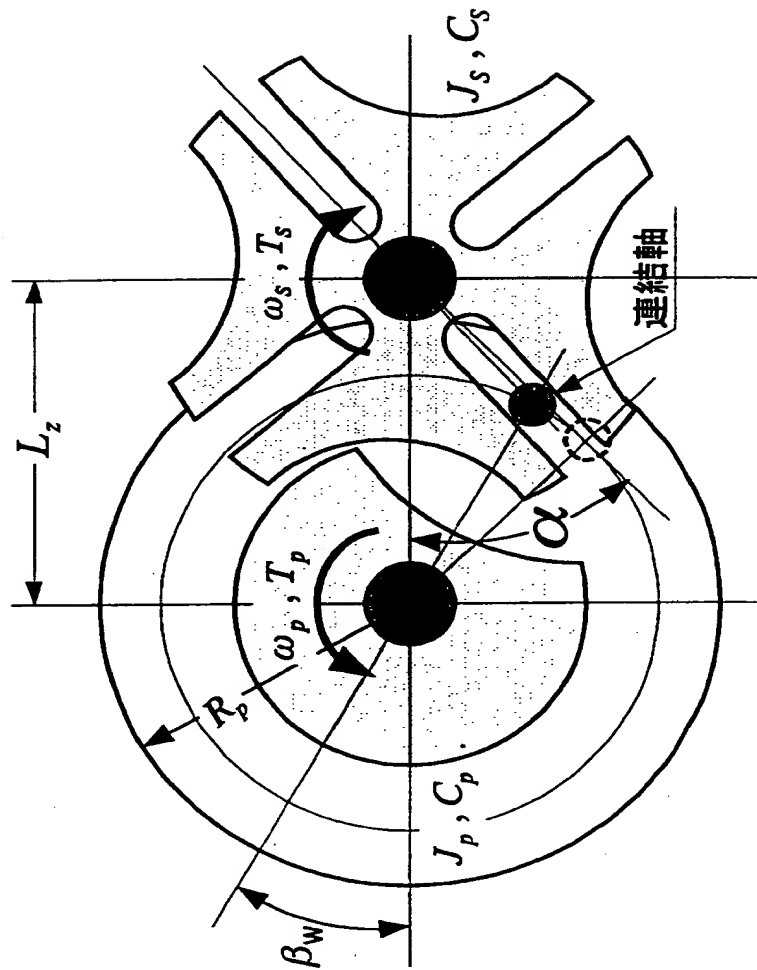
【図 1 9】



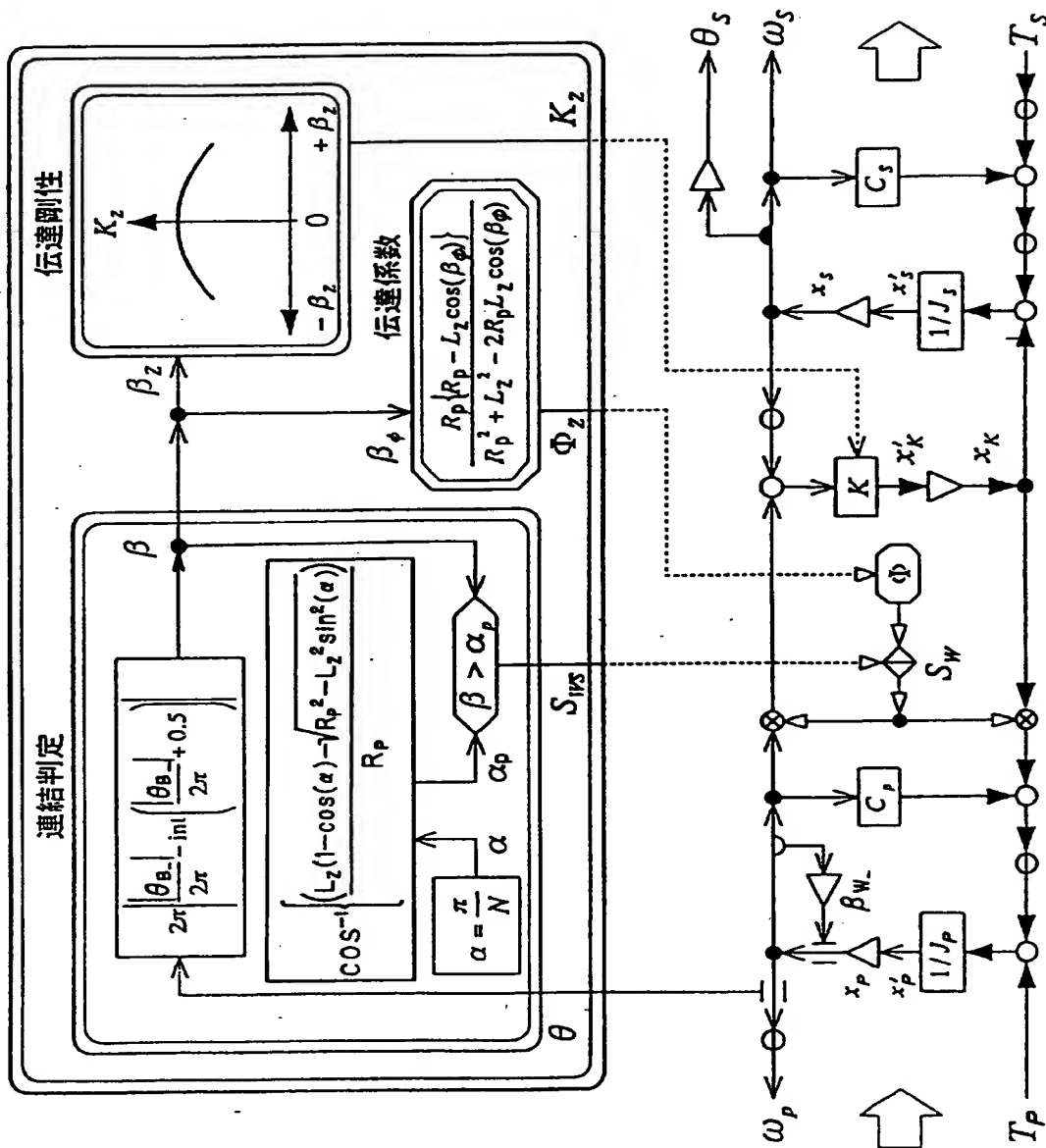
【図 2 0】



【図 2 1】

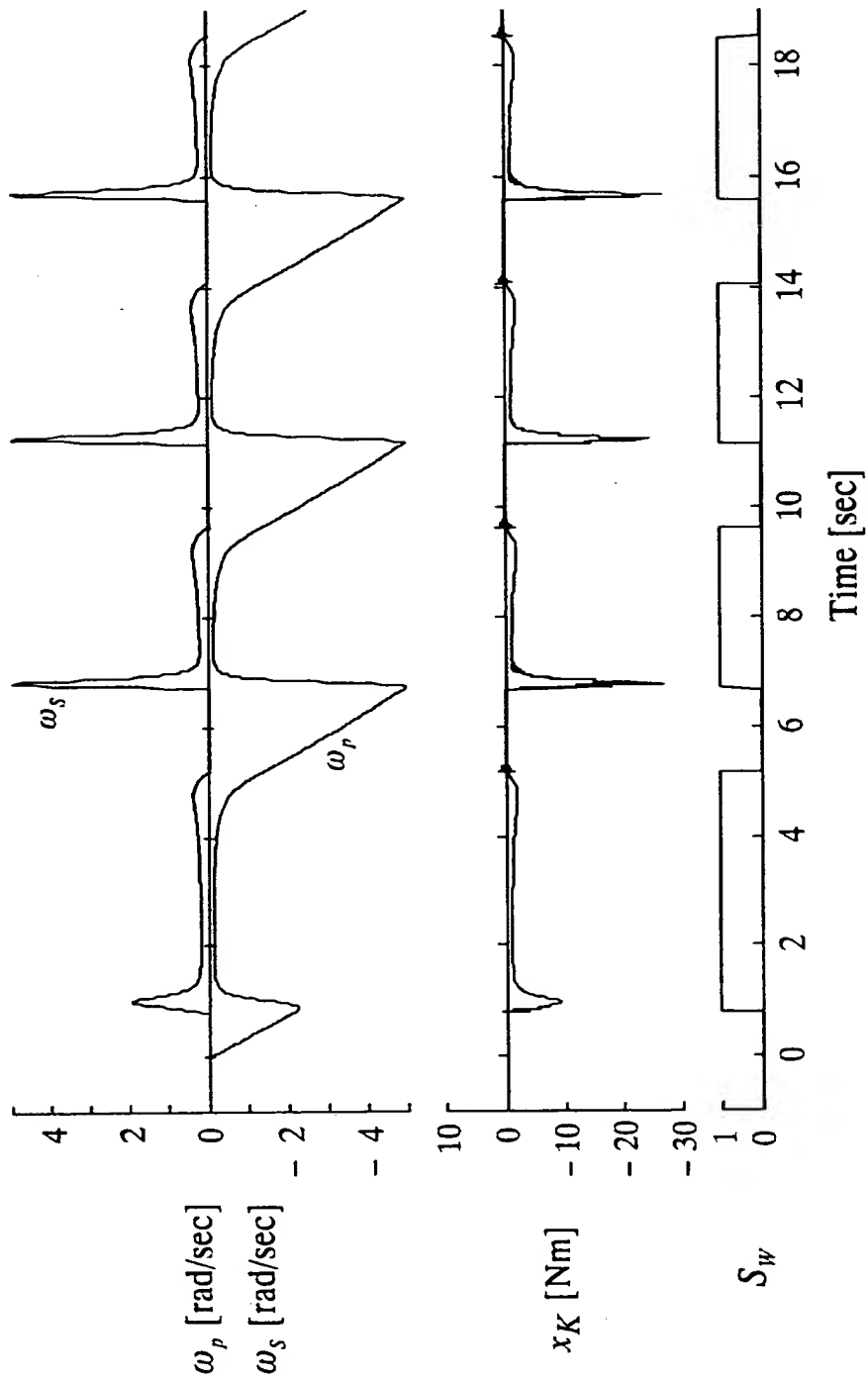


【図 22】

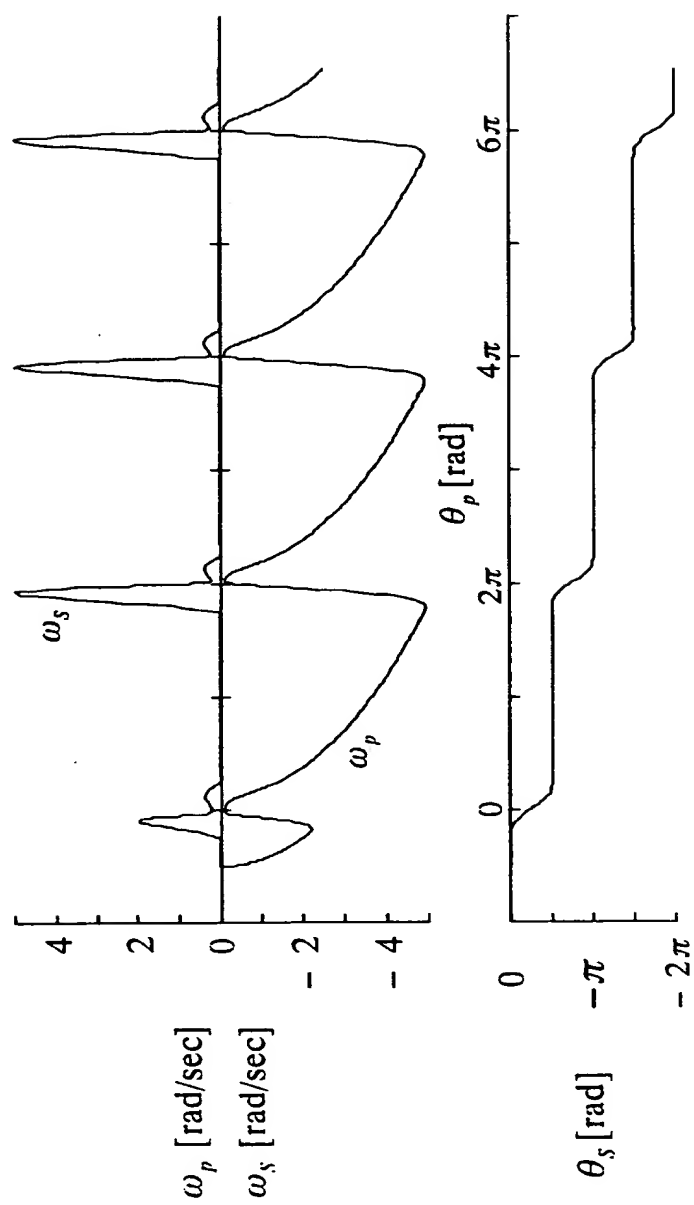




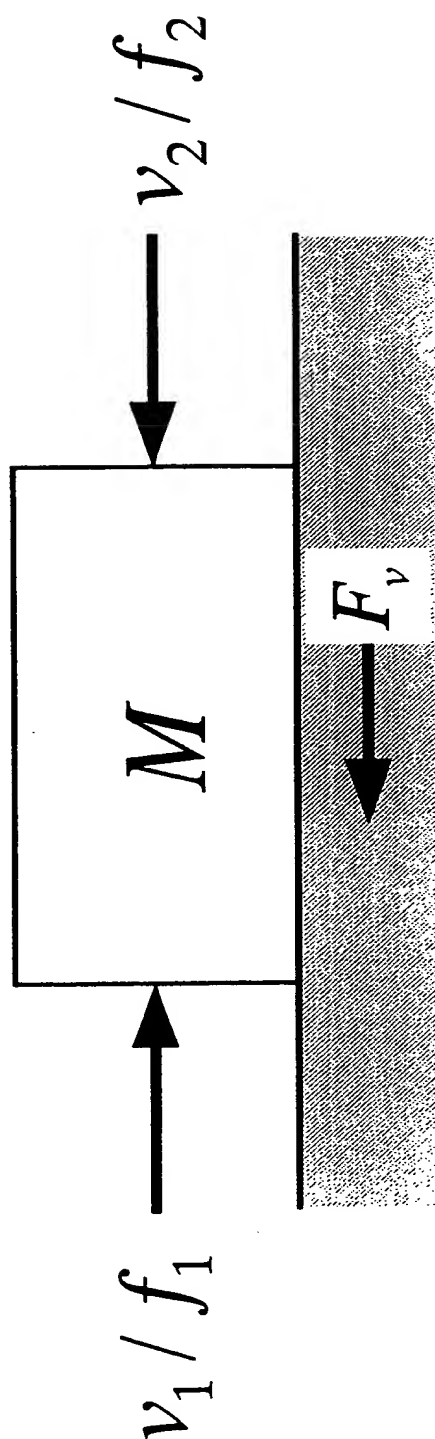
【図 2 3】



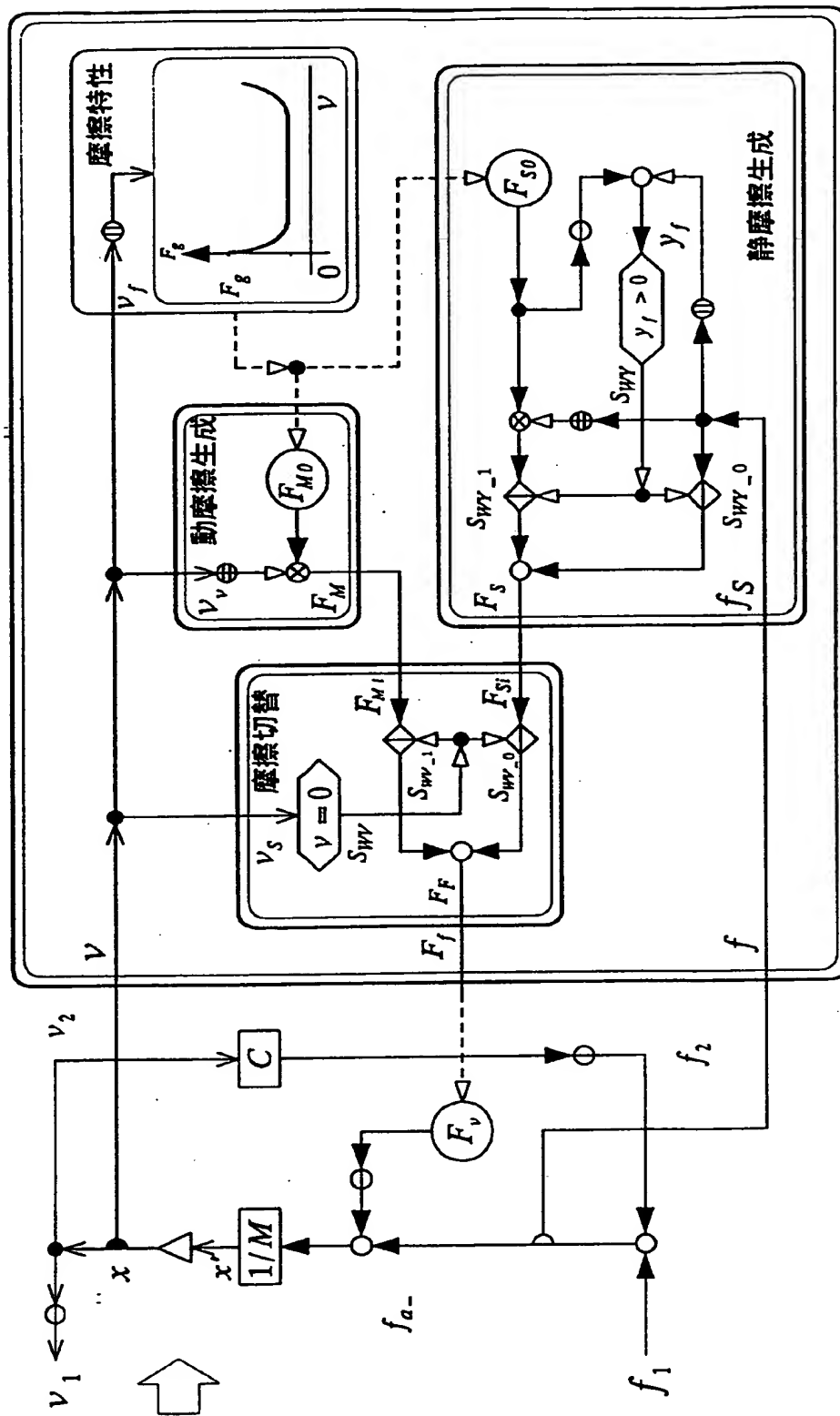
【図 2 4】



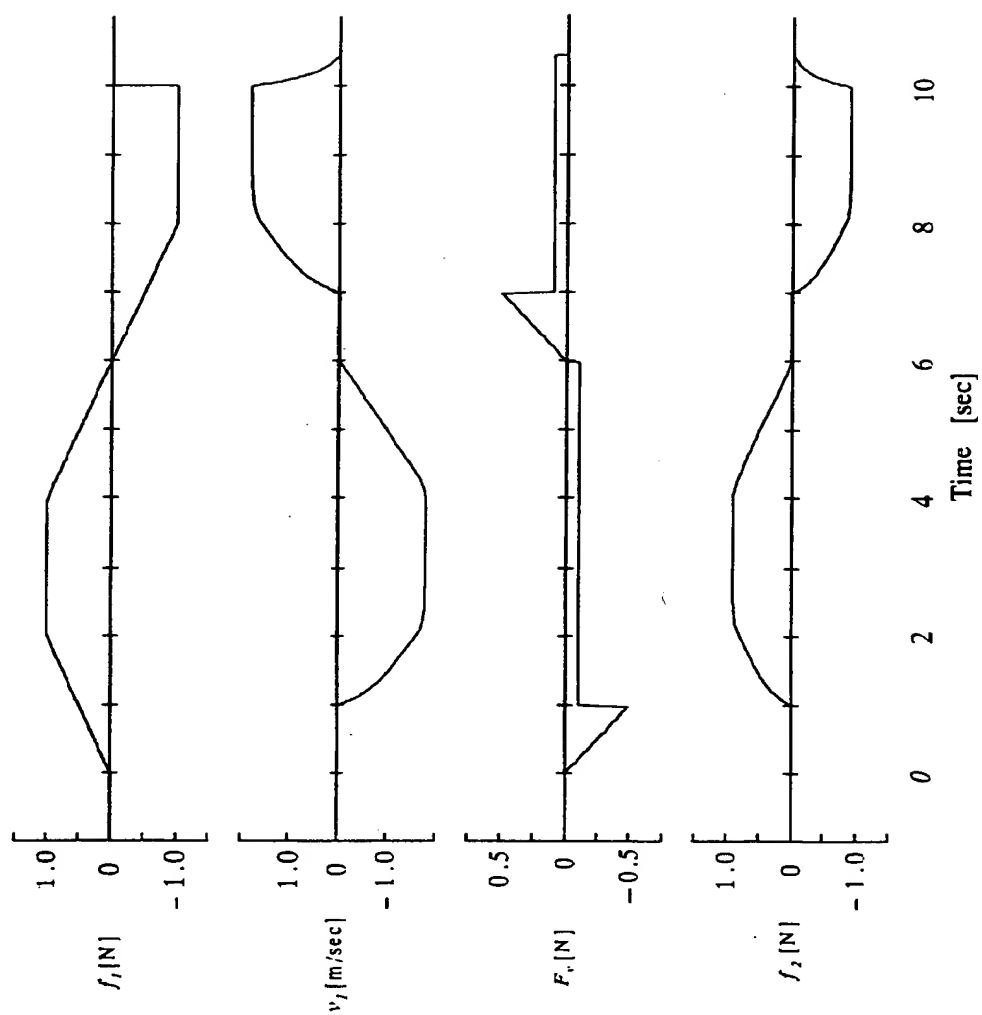
【図 2 5】



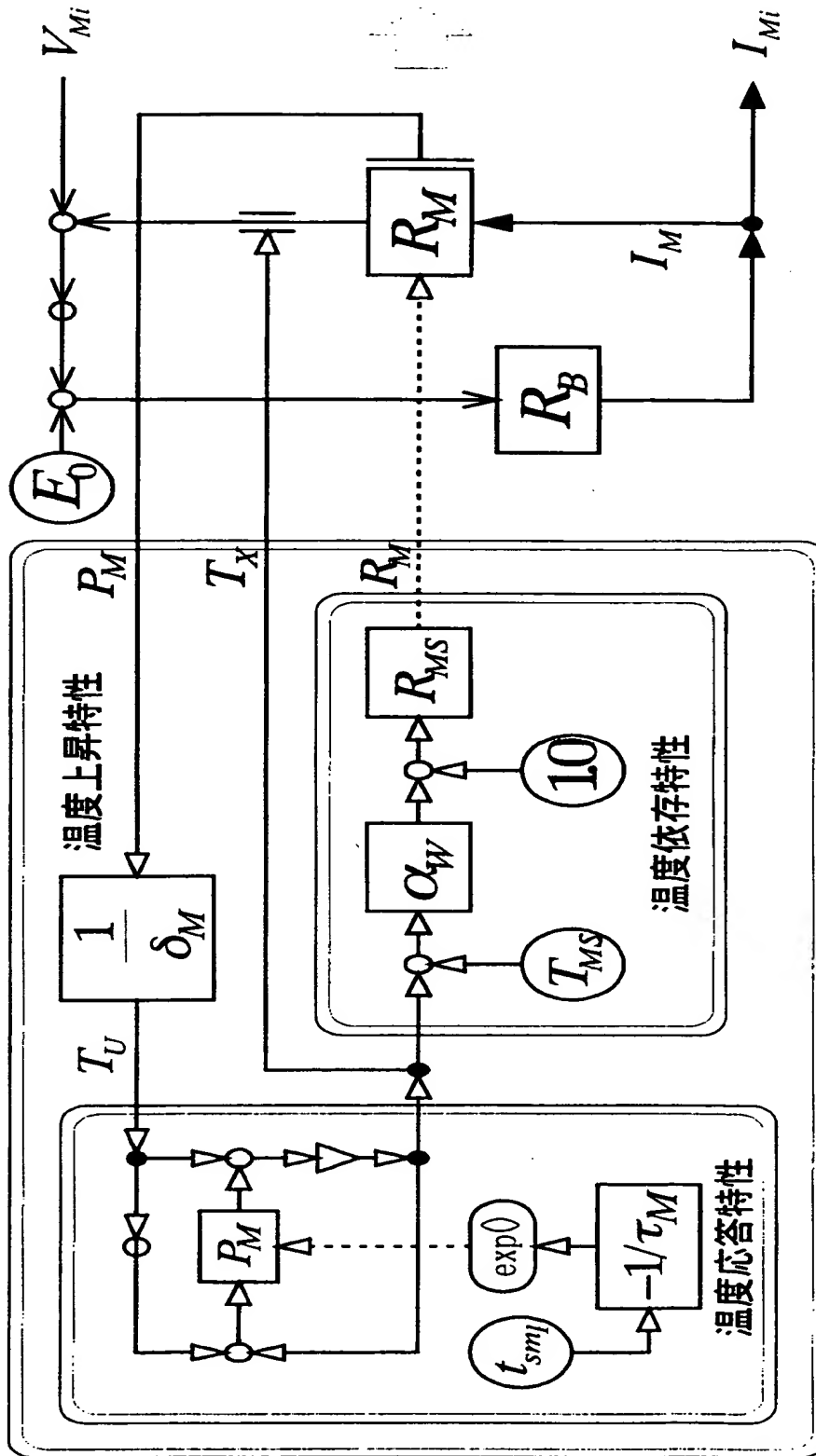
【図 26】



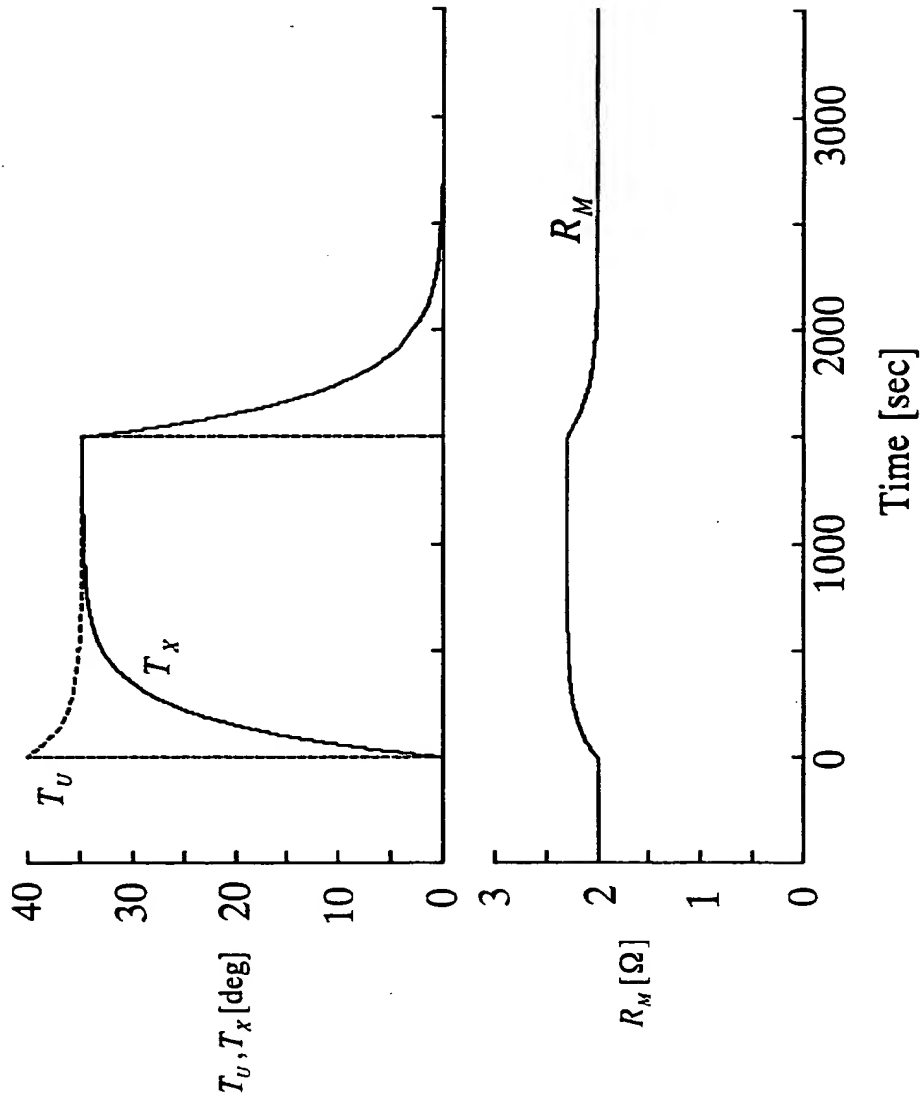
【図 2 7】



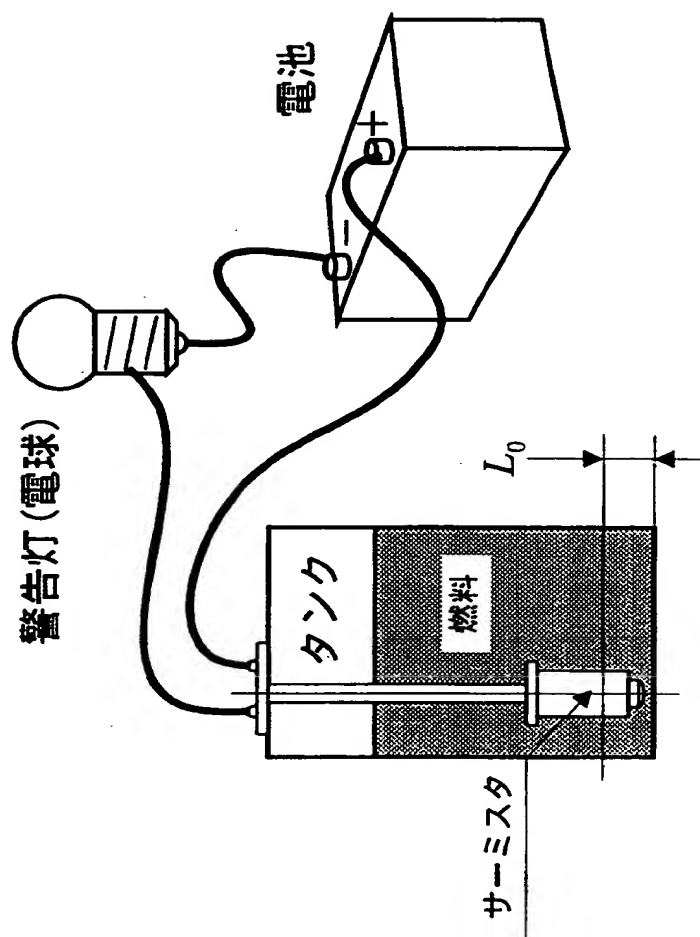
【図 2 8】



【図 2 9】

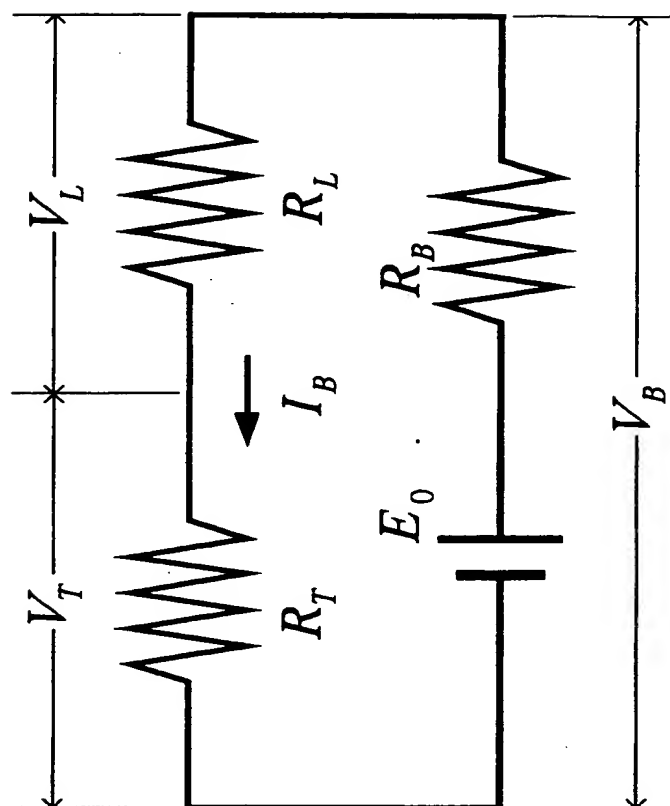


【図 30】

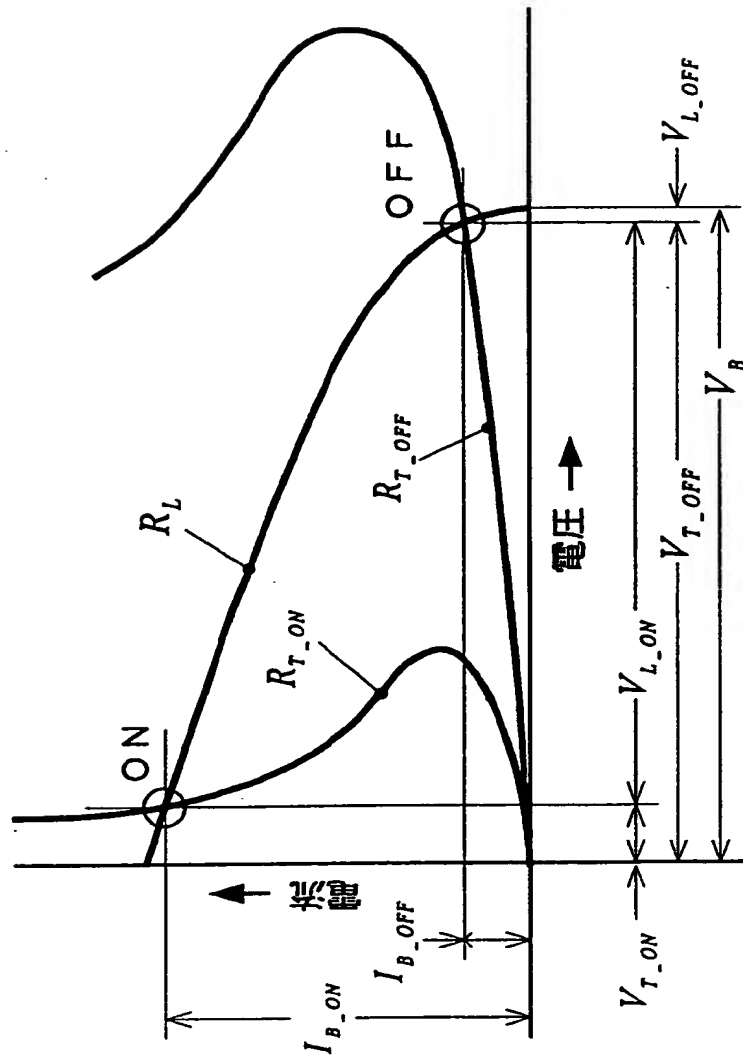




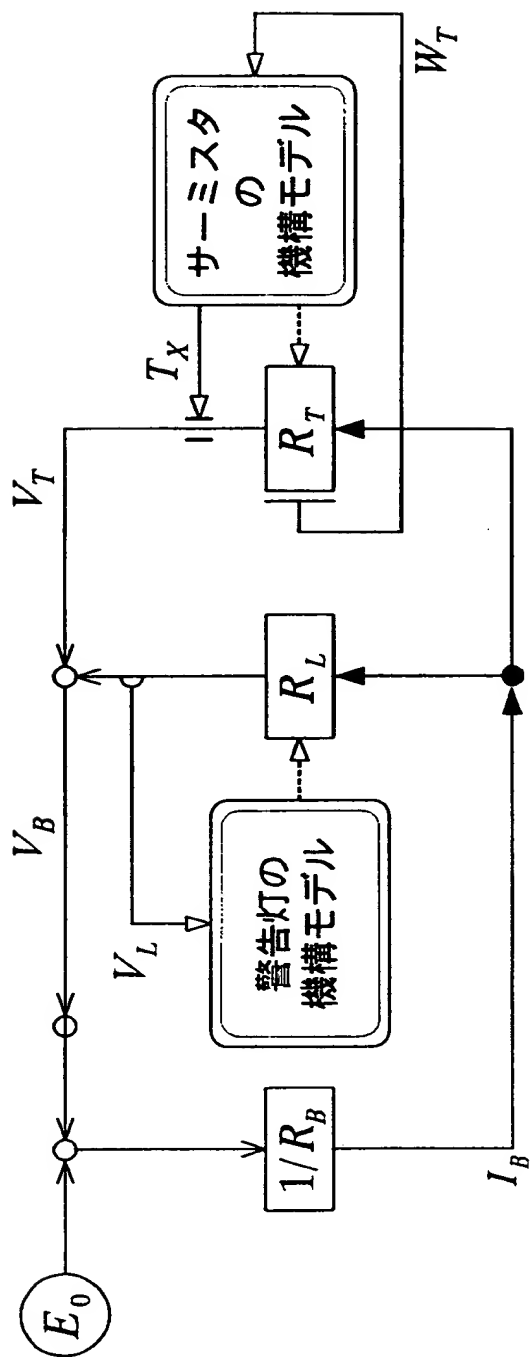
【図 3 1】



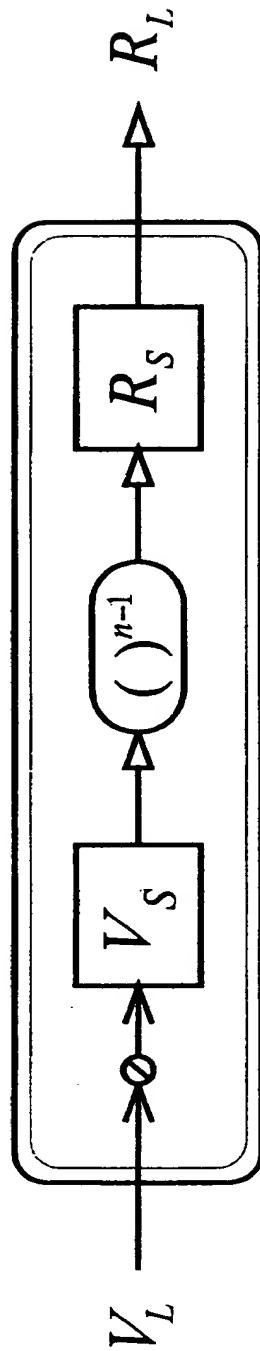
【図 3 2】



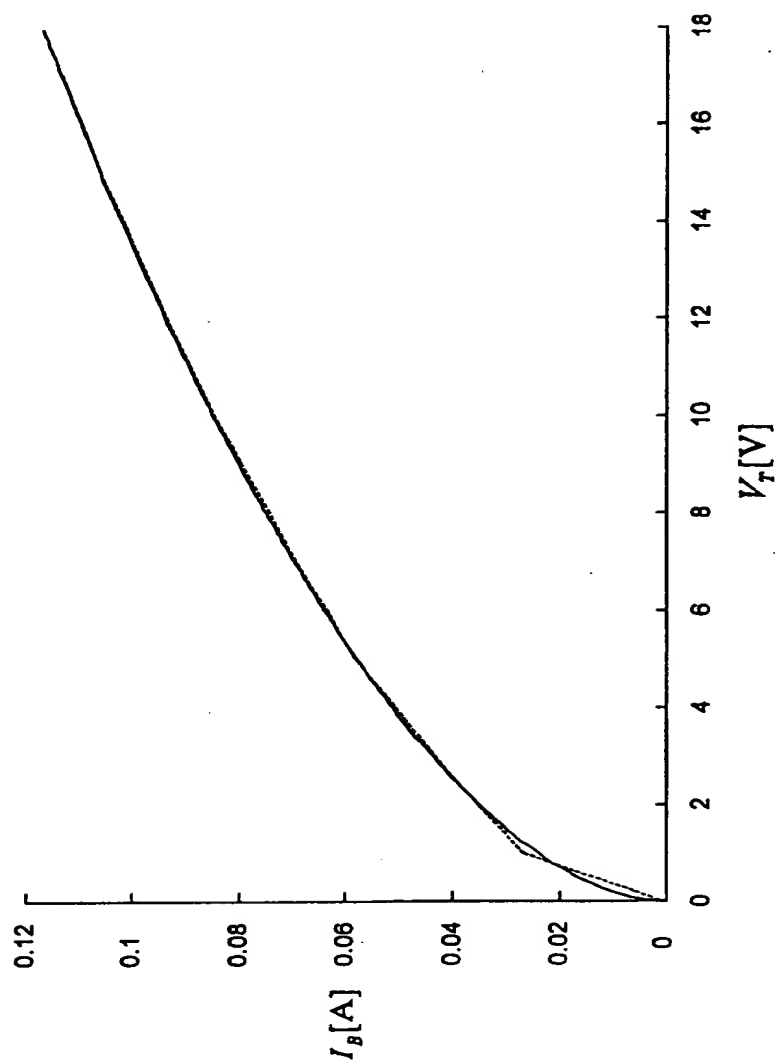
【図 3 3】



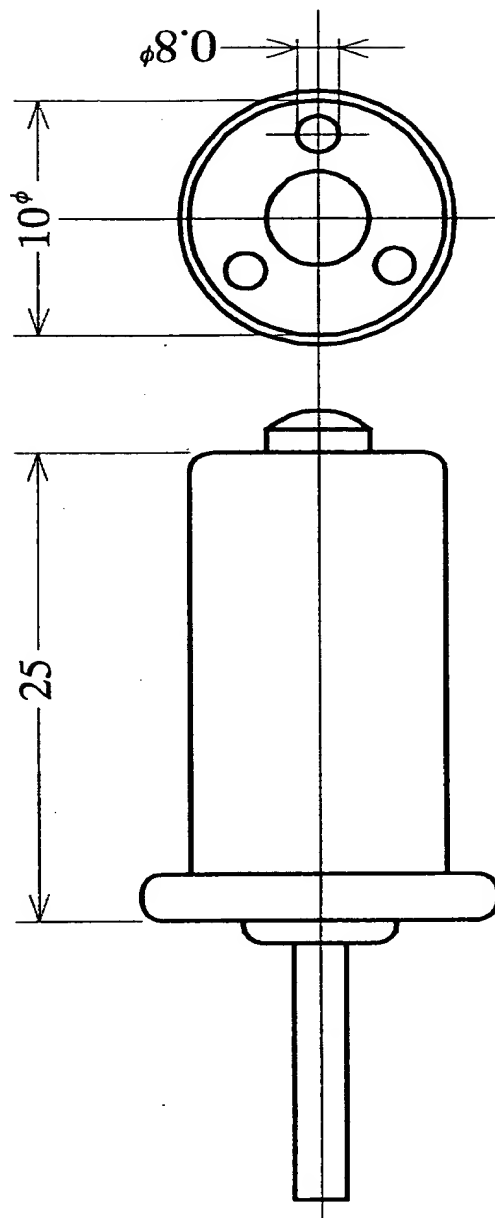
【図 3 4】



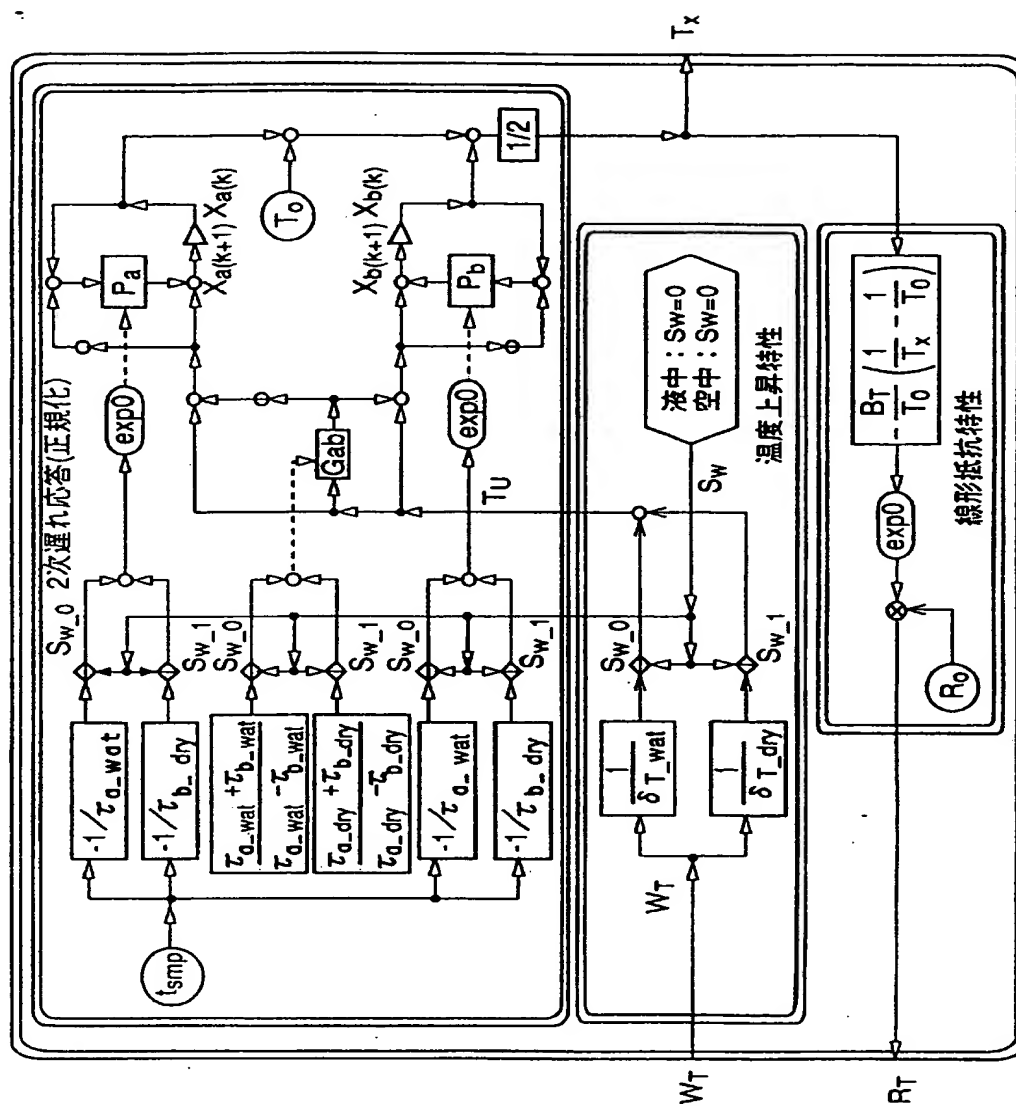
【図 3 5】



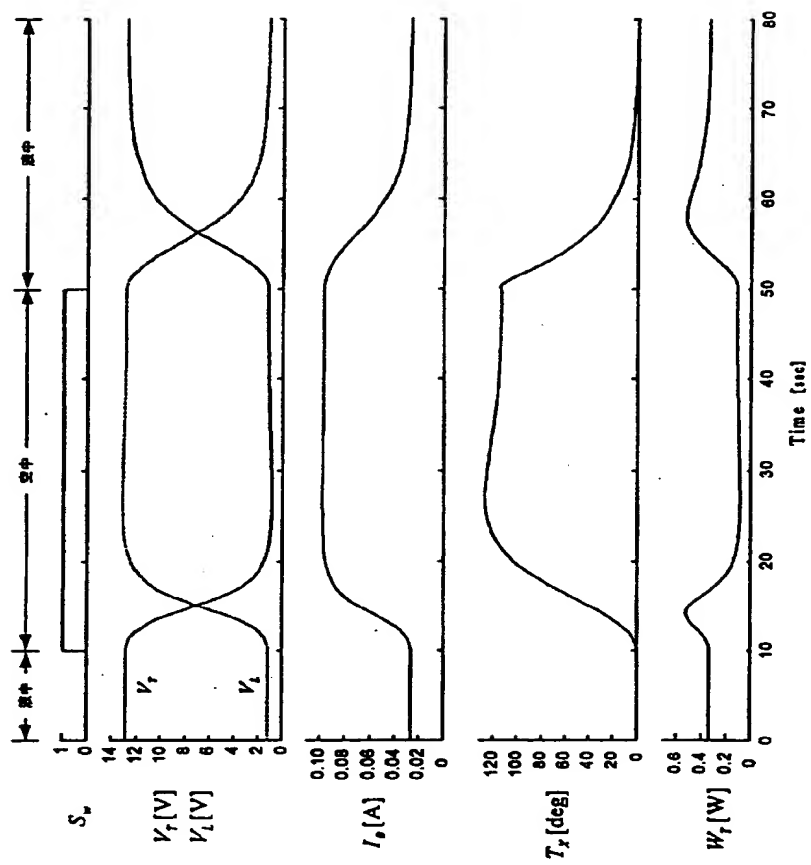
【図 3 6】



【図 37】

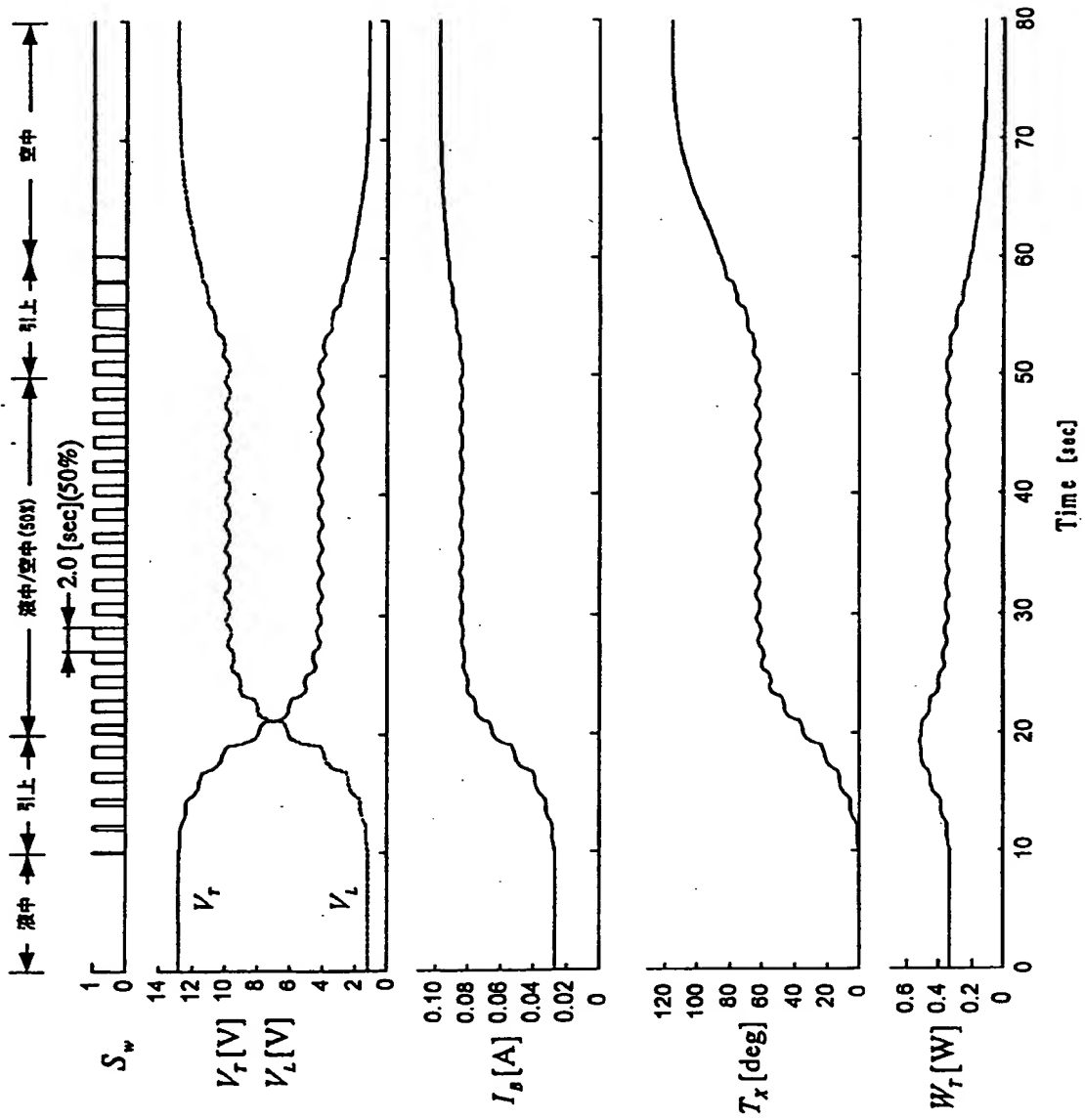


【図 3 8】

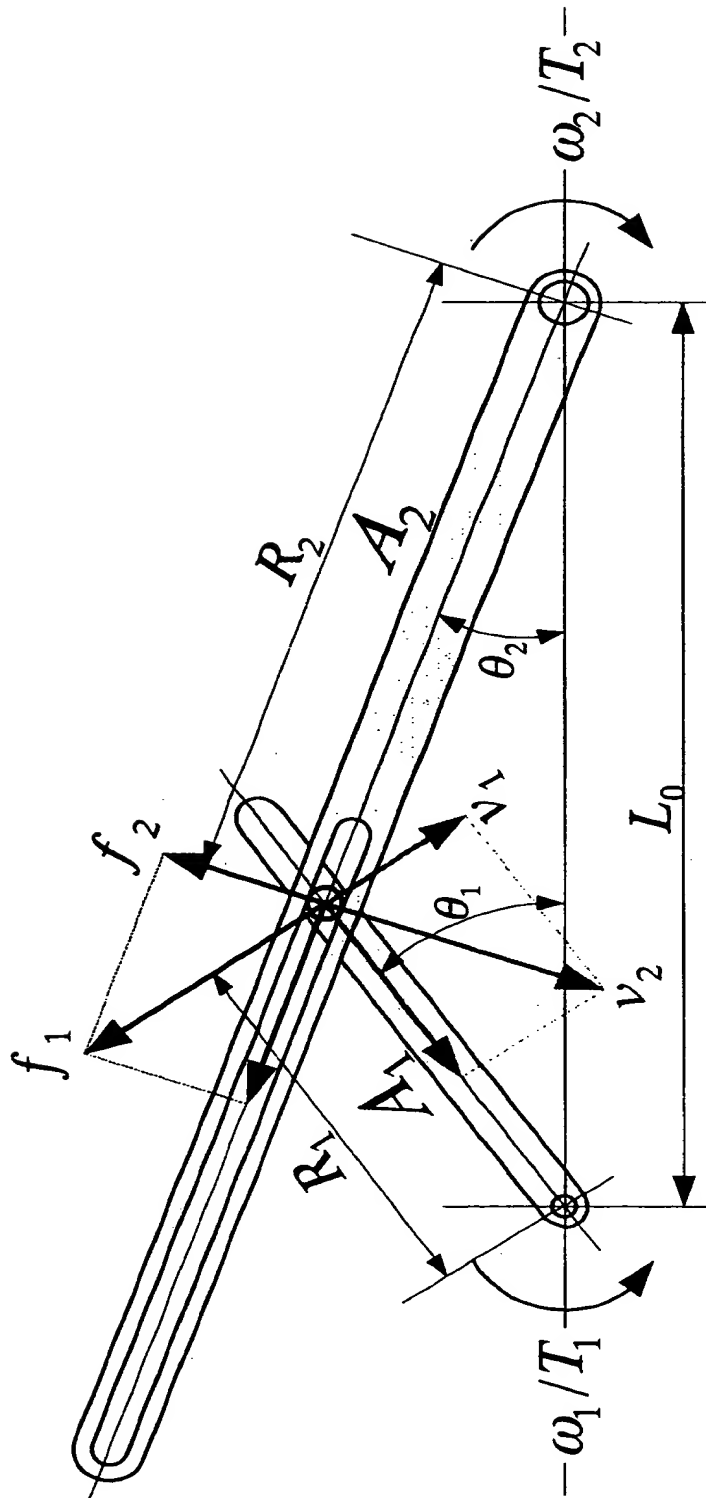




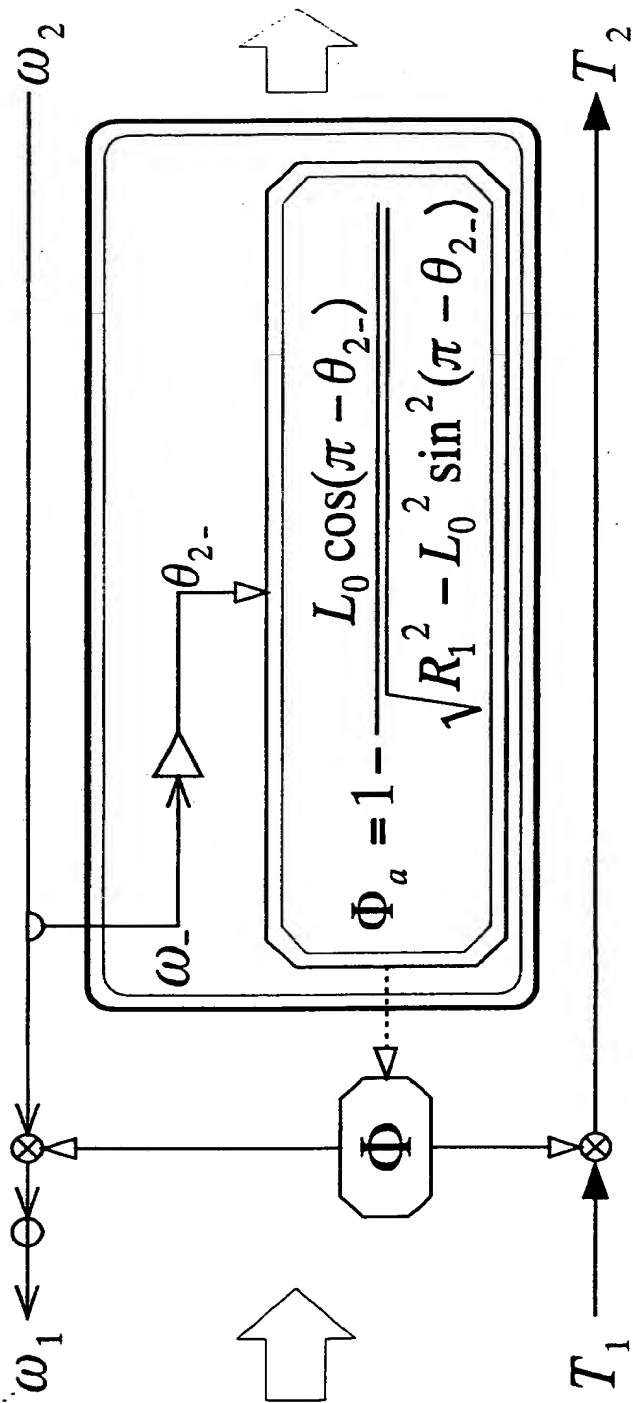
【図 39】



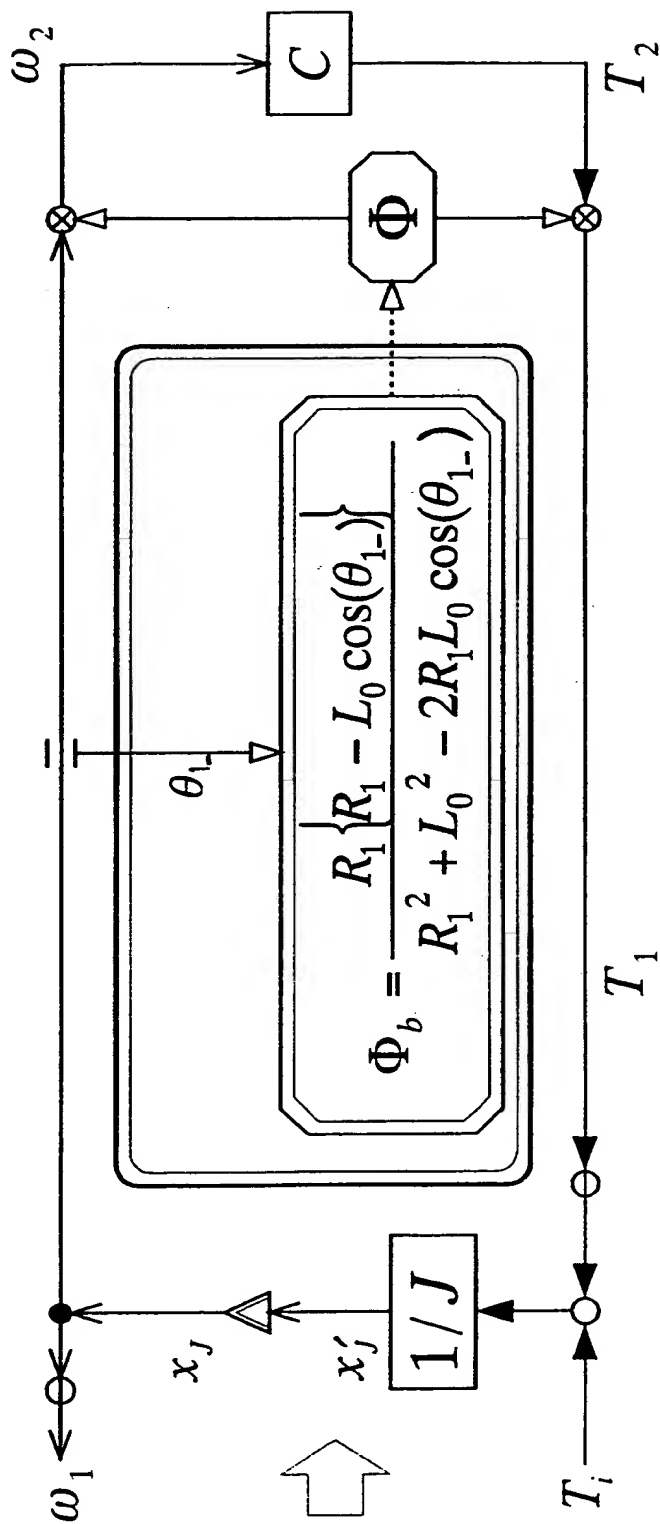
【図 4 0】



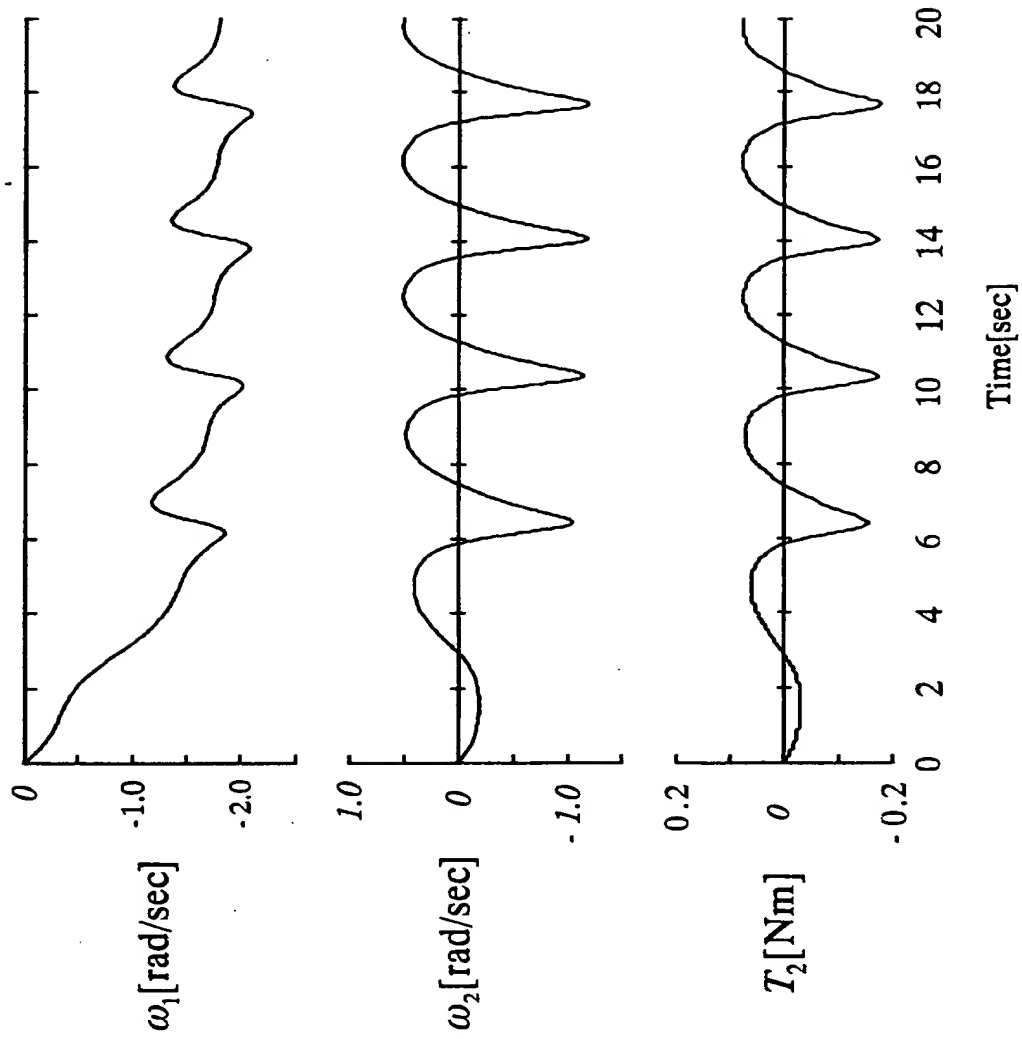
【図 4 1】



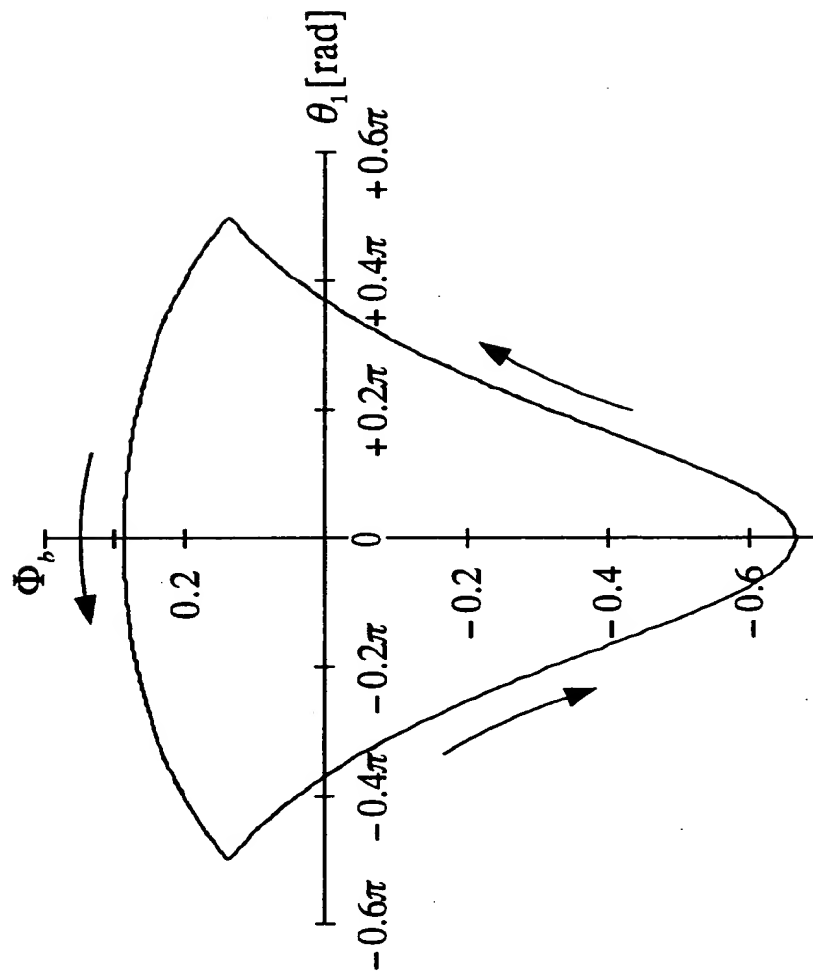
【図 4 2】



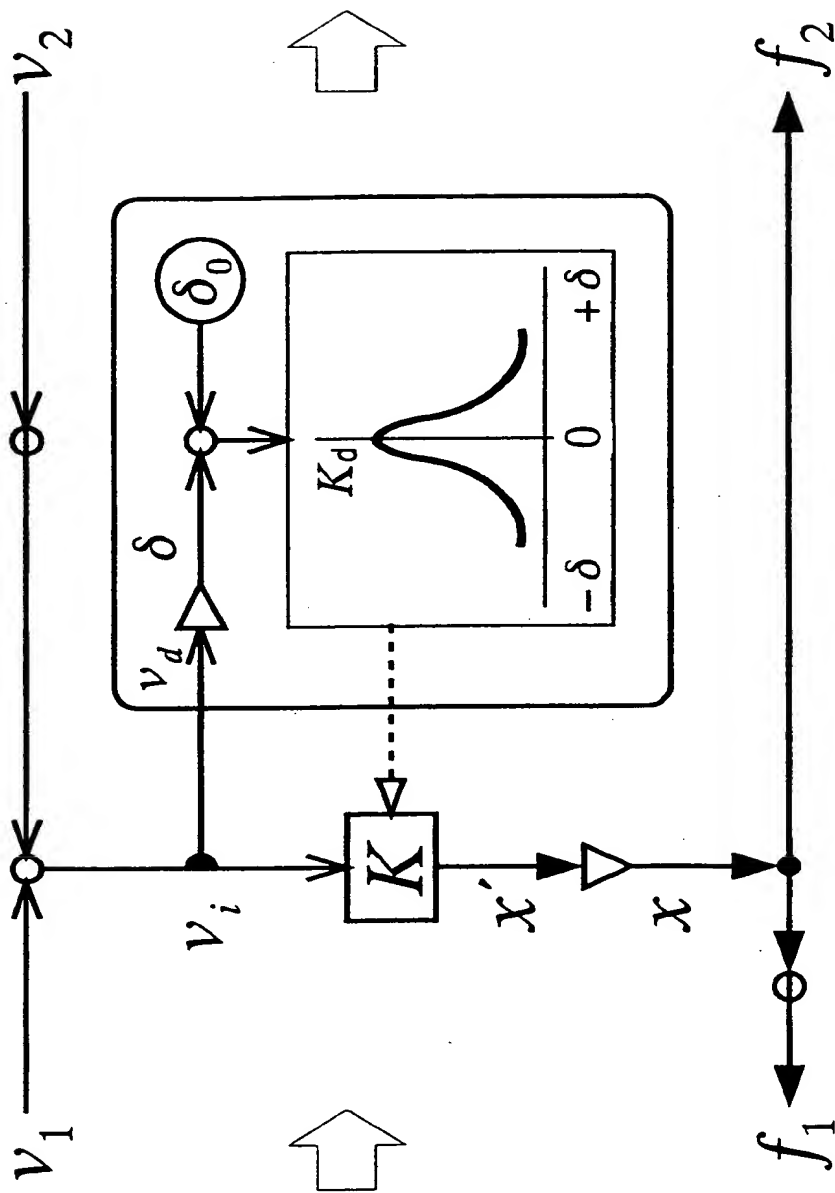
【図 4 3】



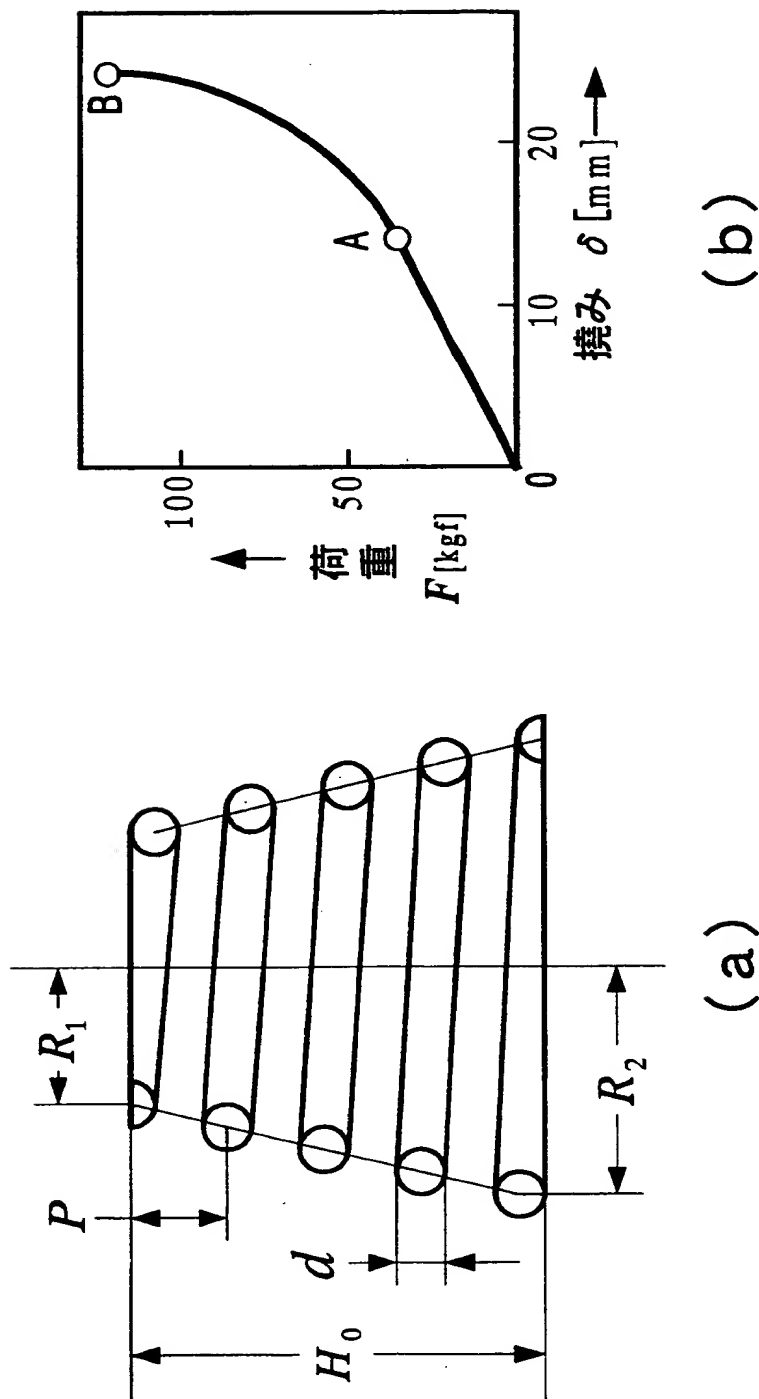
【図 4 4】



【図 4 5】

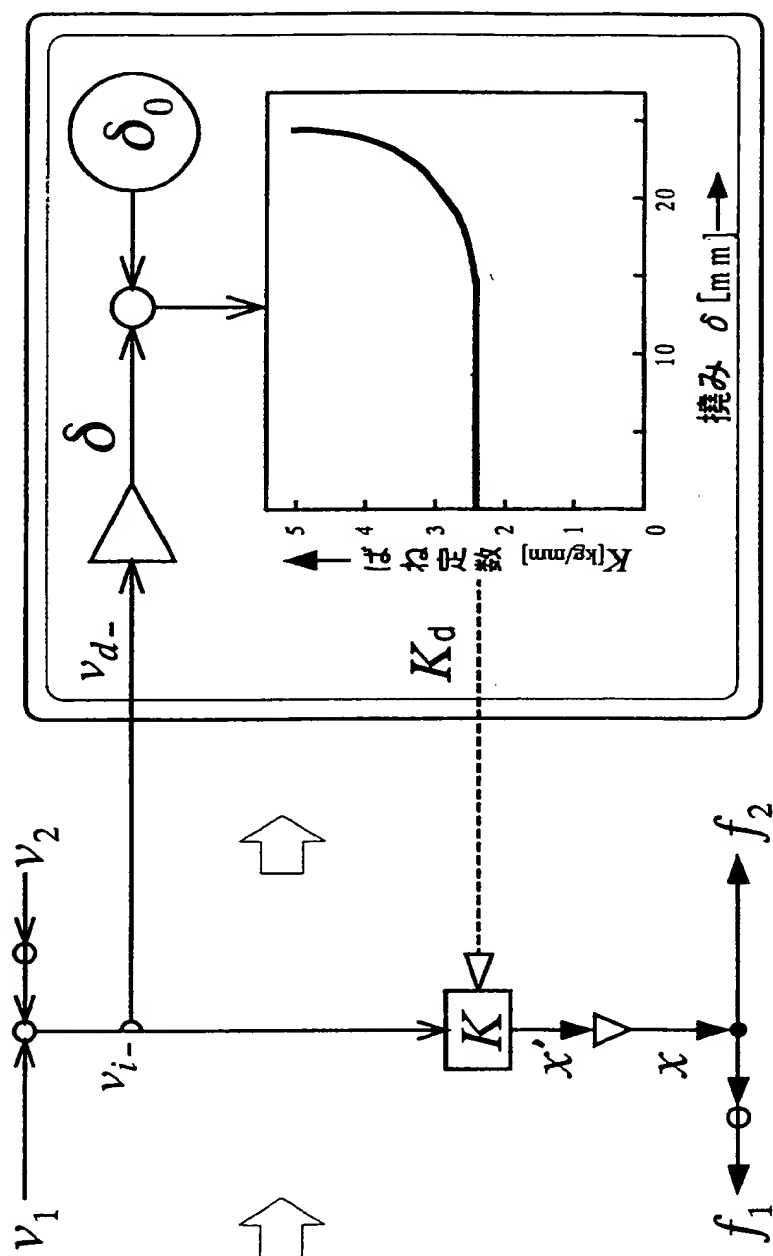


【図 4 6】

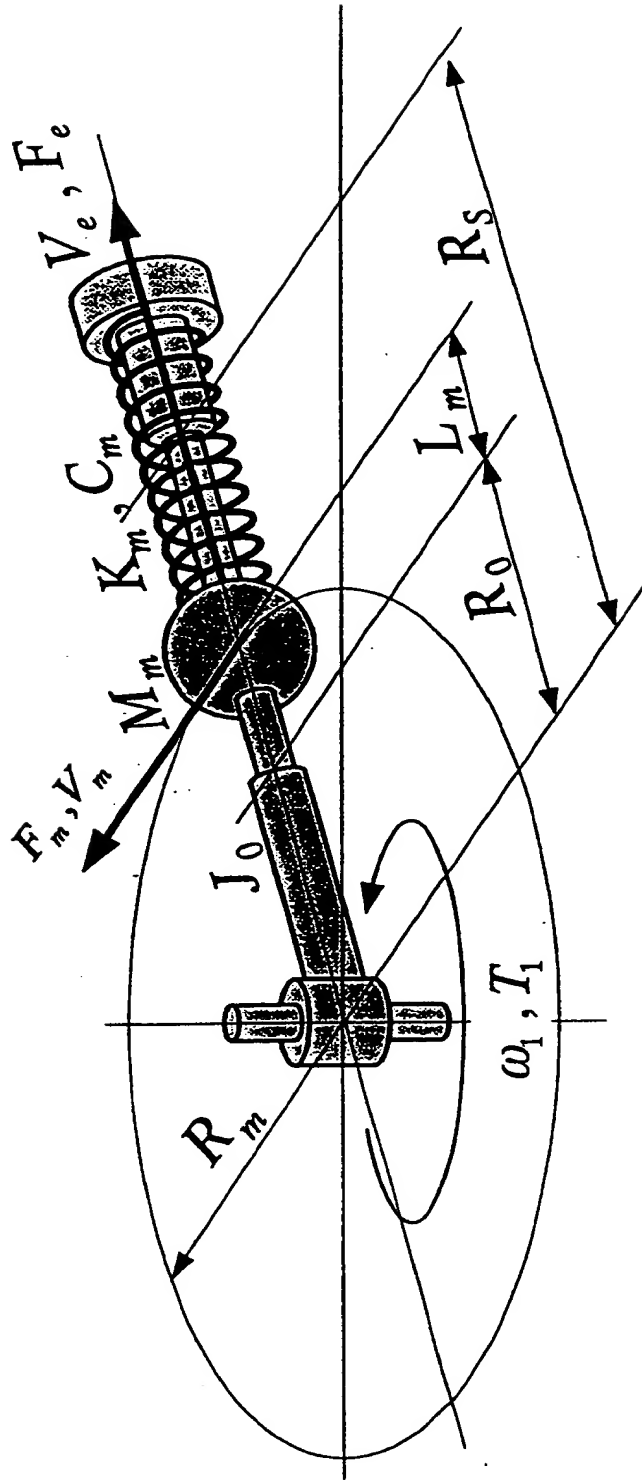




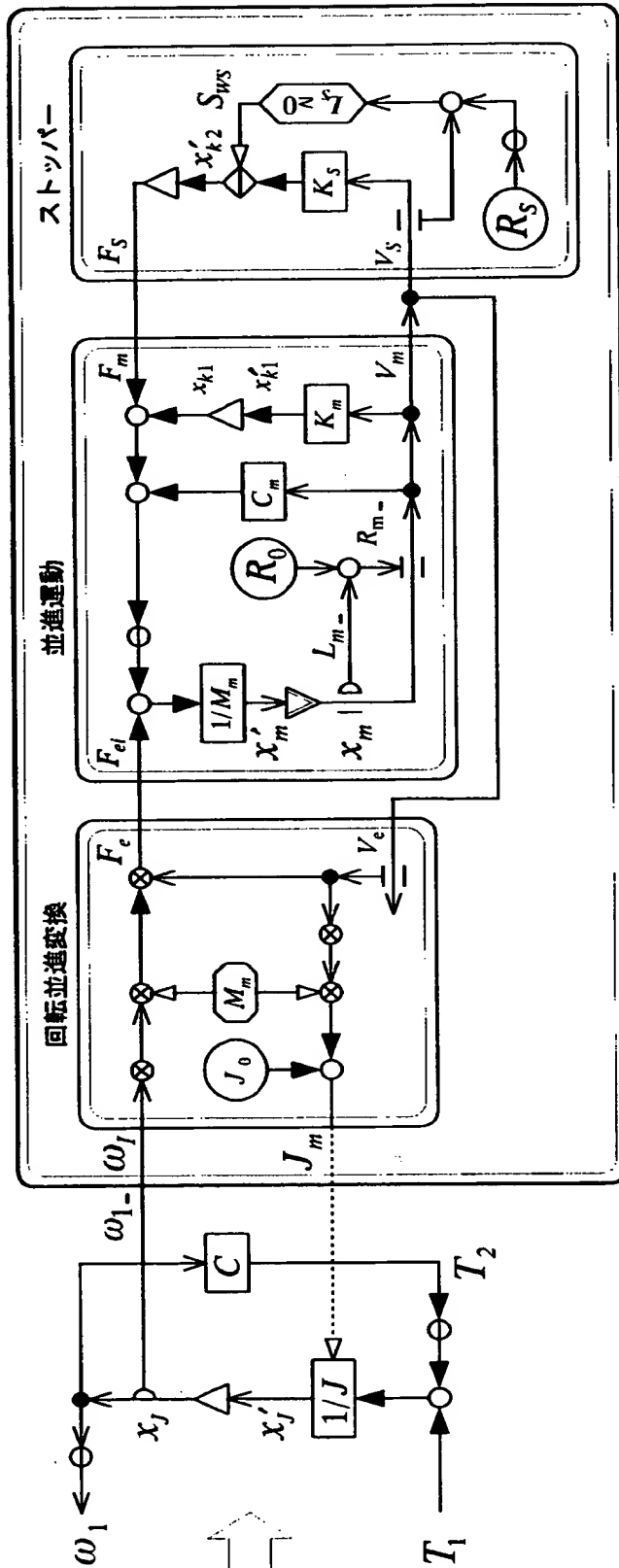
【图 4-7】



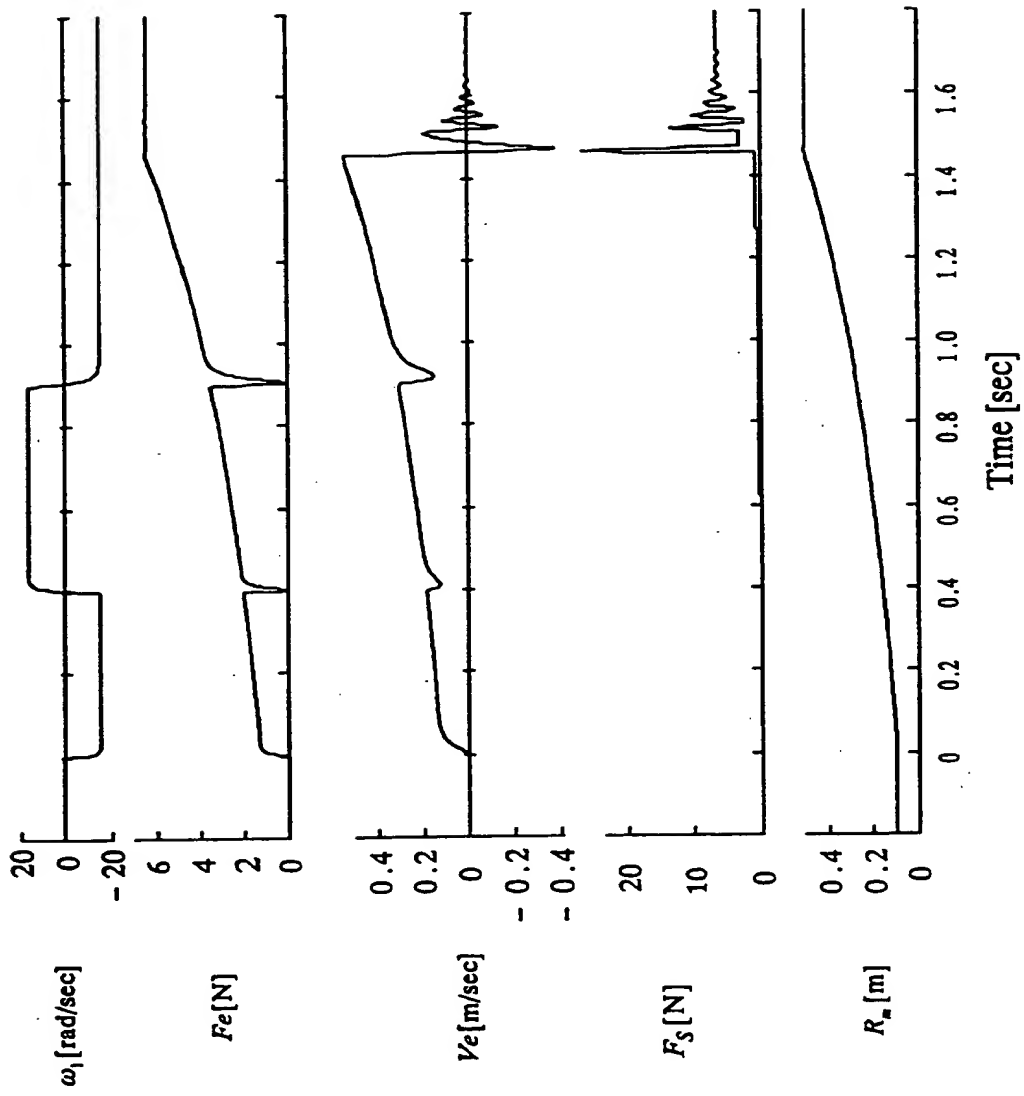
【図 4 8】



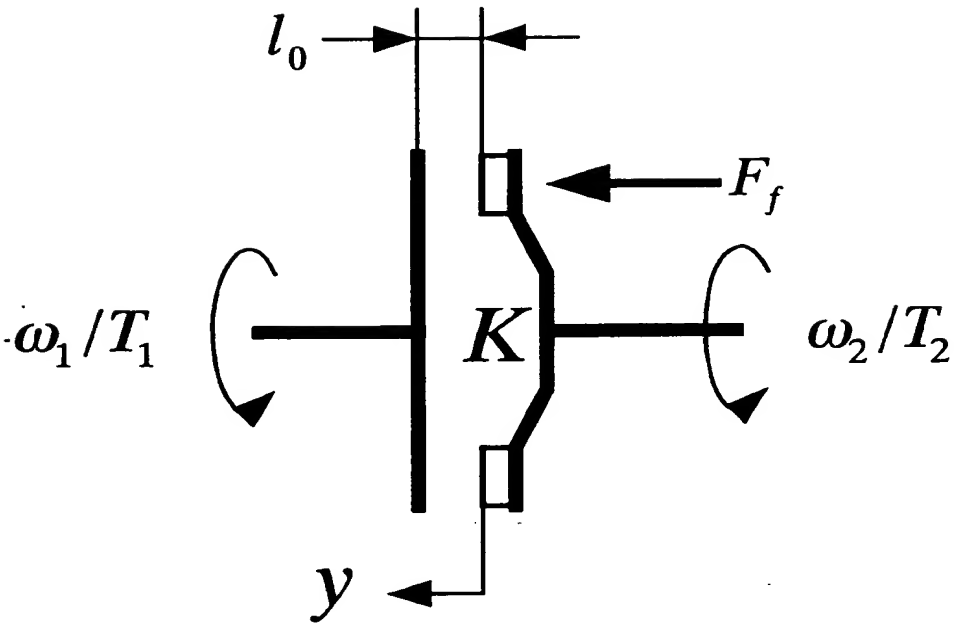
【図 49】



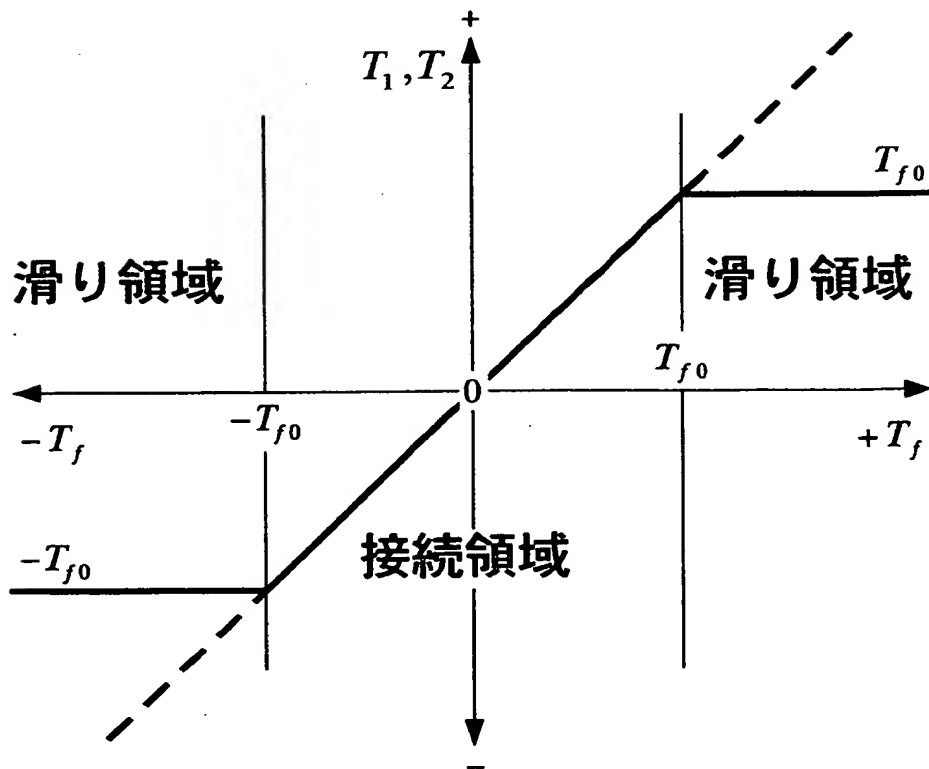
【図 5 0】



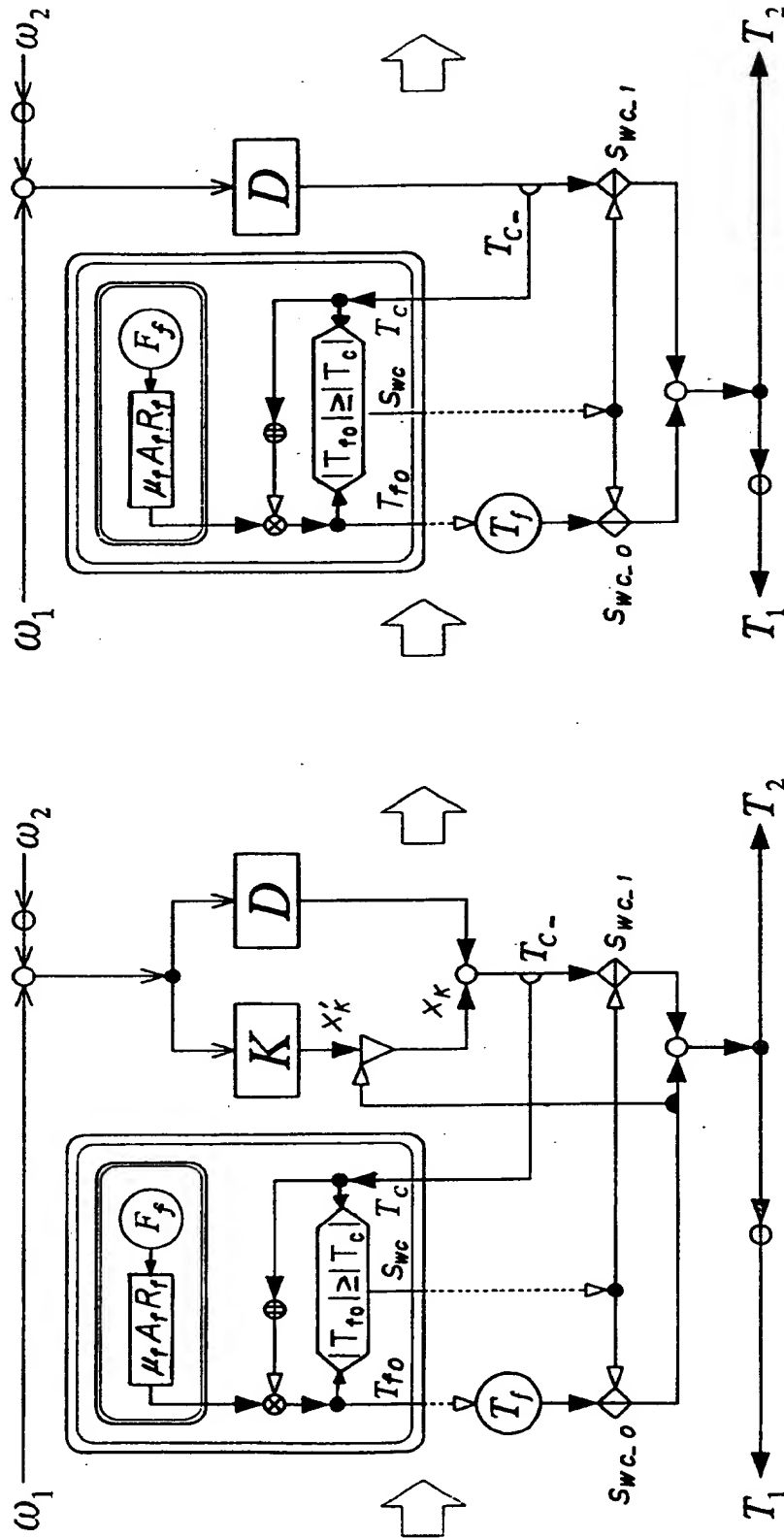
【図 5 1】



【図 5 2】



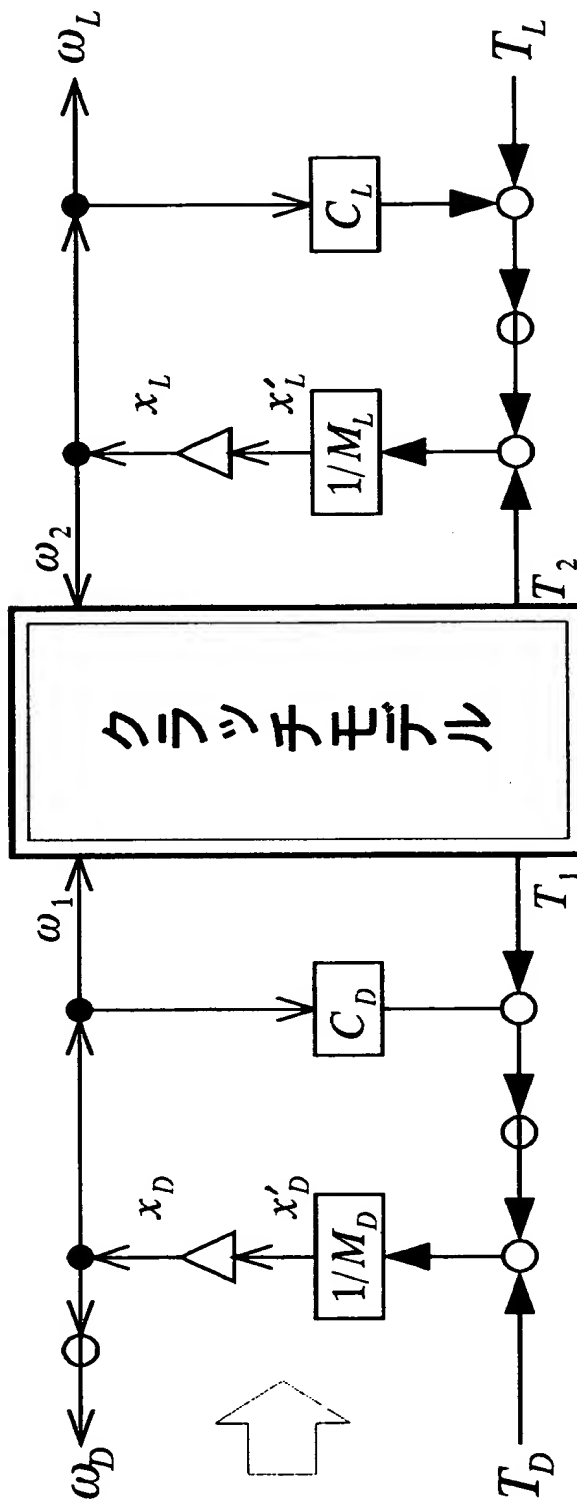
【図 53】



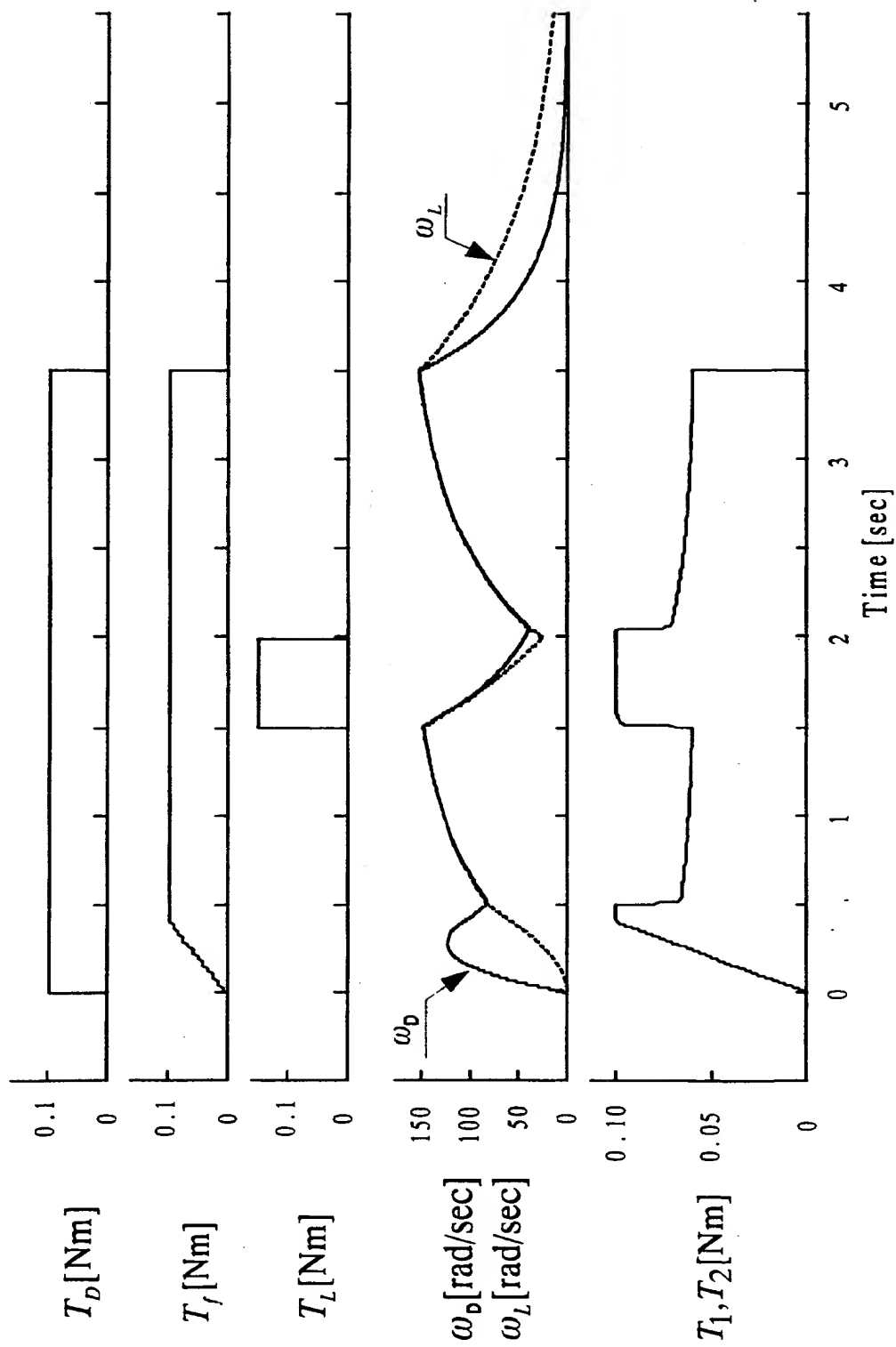
(b) 粘性係数によるモデル

(a) クラッチ剛性によるモデル

【図 5 4】

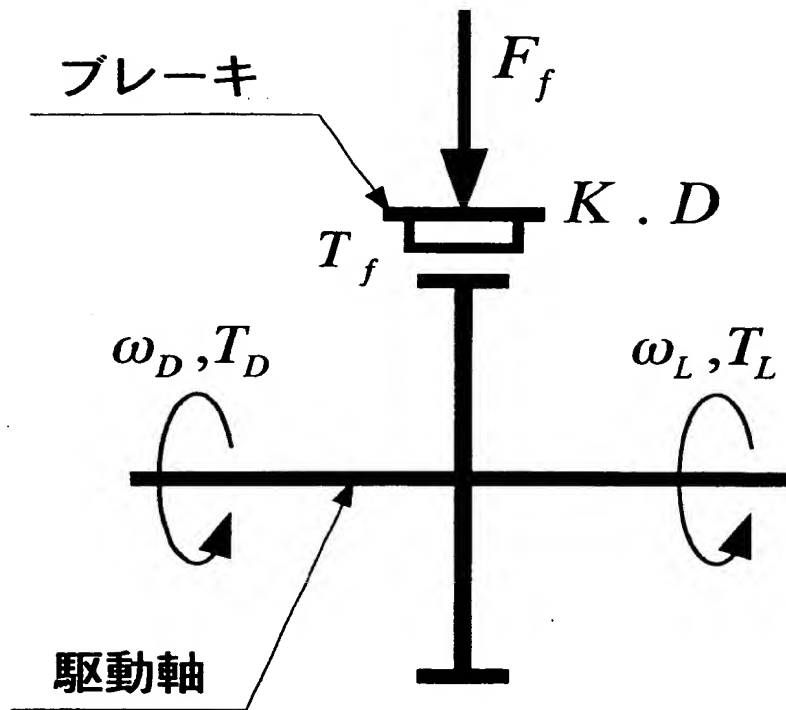


【図 5 5】

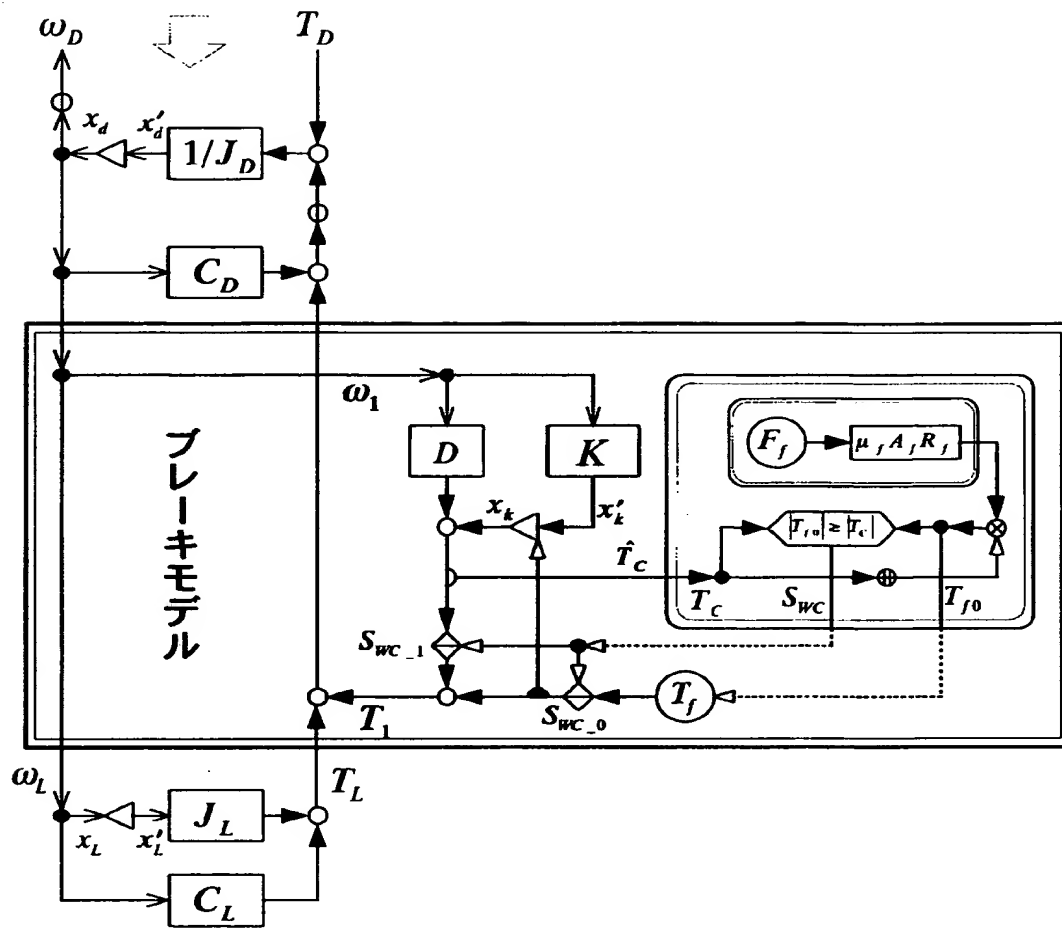




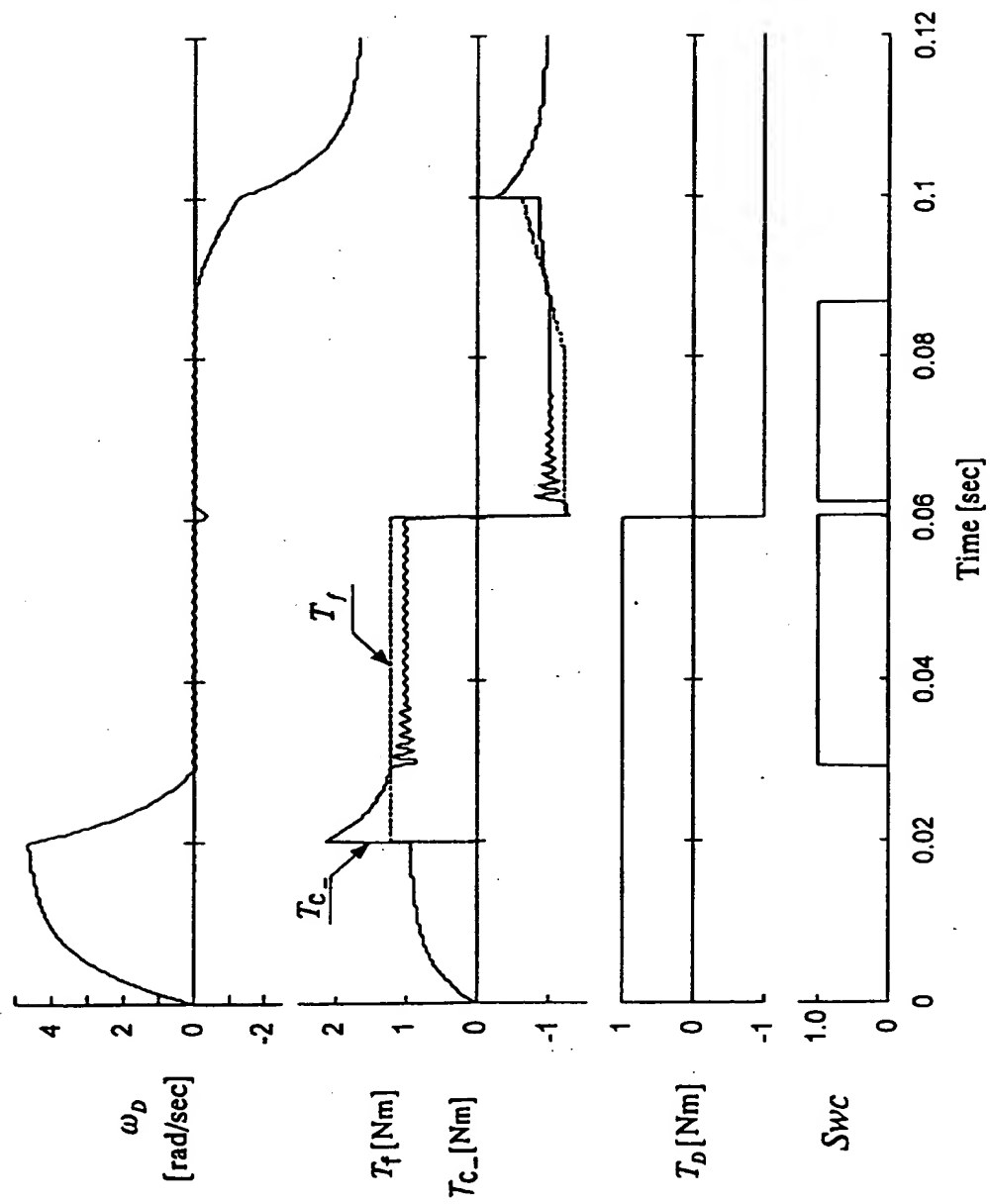
【図 5 6】



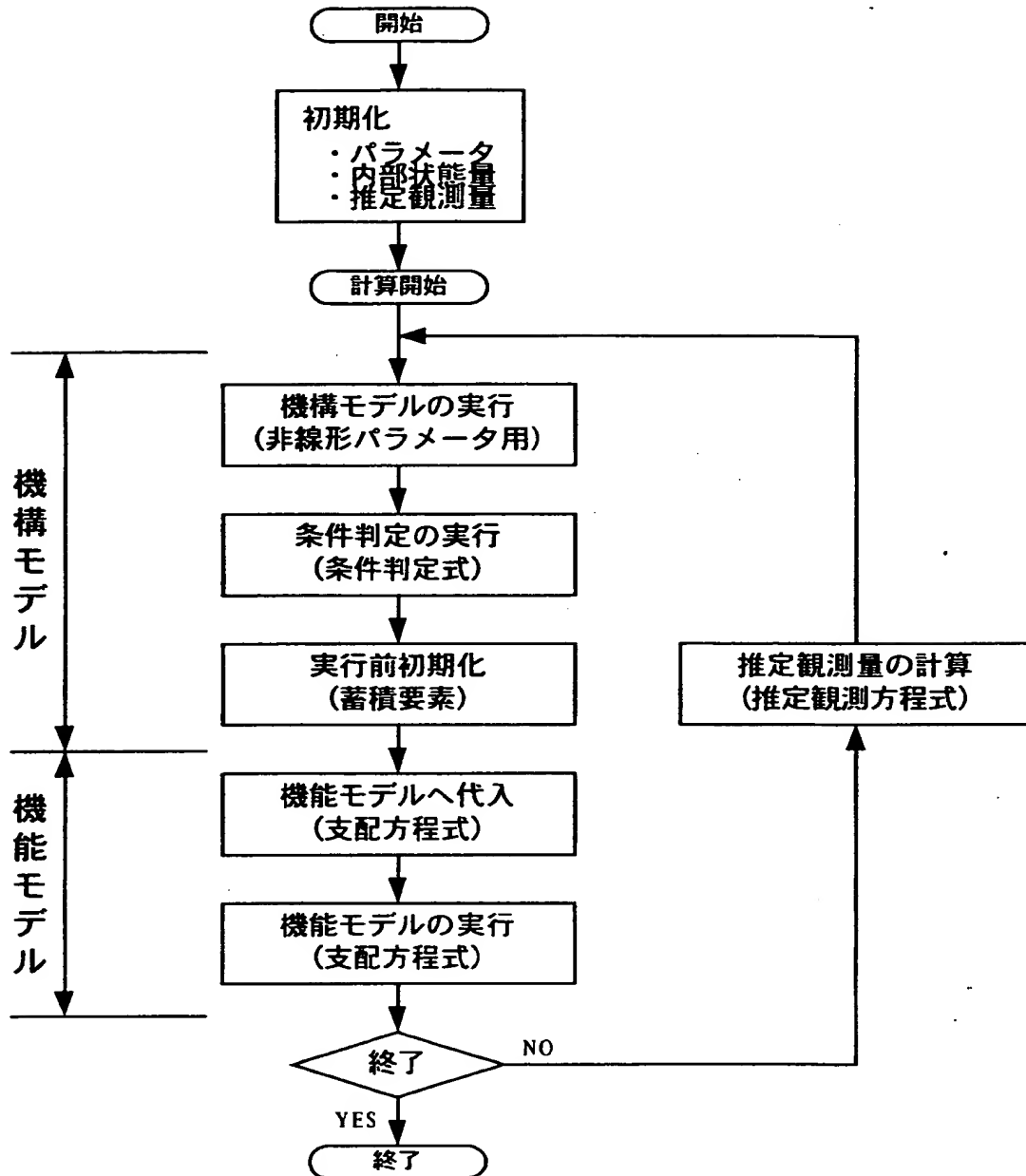
【図 57】



【図 5 8】











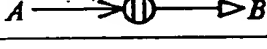
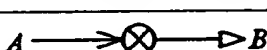

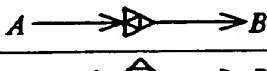
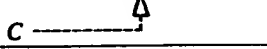
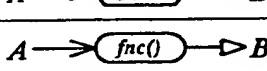
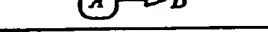


【図 59】



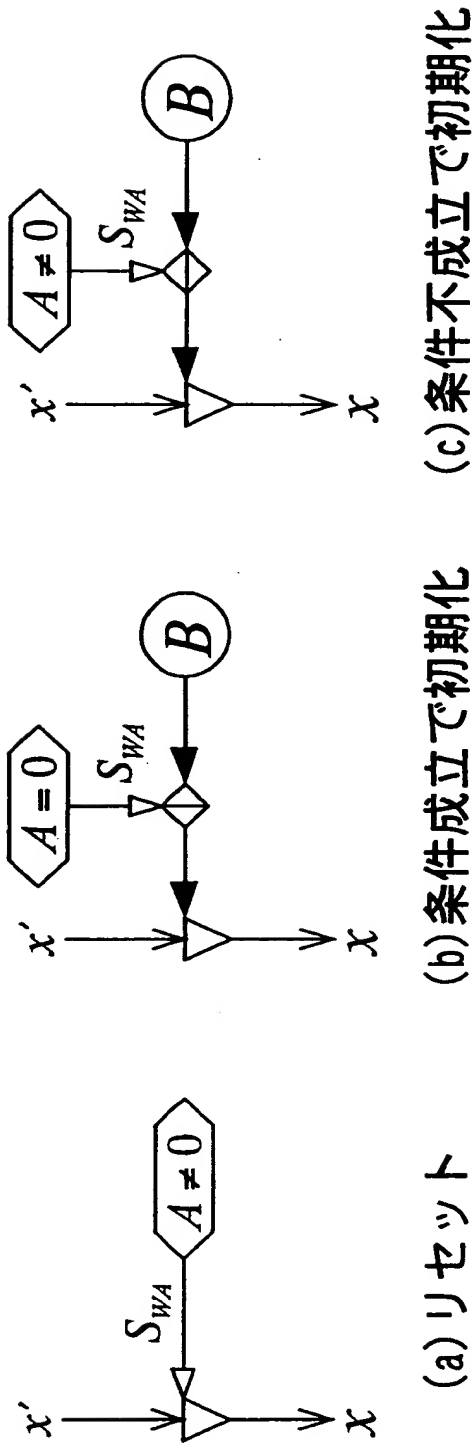
【図 6 0】

記号名		記号	備考
状態量	エネルギー		エネルギー 入出力の方向
	位差量		電圧、速度、流量、など
	流動量		電流、力、圧力、など
演算子	加算		$C = A + B$
	乗算		$C = A \times B$
	分岐(分配)		$A = A = A$
	符号変換		$B = -A$
	逆変換		$B = 1/A$
	積分		$B = \int A dt$
	微分		$B = dA/dt$
性質	係数変換		$B = R \times A$ ( $R$ : 係数)
	特性変換		$B = P \times A$ ( $P$ : 特性)
	側負荷		$B = A$ ( $A$ : 状態量)
	座標係数		$B = \Phi A$ $\Phi^{-1}D = C$ ( $\Phi$ : 係数)
参照	観測点		$B = A$ ( $B$ : $A$ の観測値)
	機能モデル要素		$A_p, B_p$ : 位差量 $A_f, B_f$ : 流動量
	蓄積状態量 (内部エネルギー)		$B = (A \text{ の内部温度設定値})$ $C = (A \text{ の内部温度観測値})$ ( $A$ : 位差量)
	エネルギー観測		$C = AB \text{ or } A^2R$ ( $A, B$ : 位差/流動量)

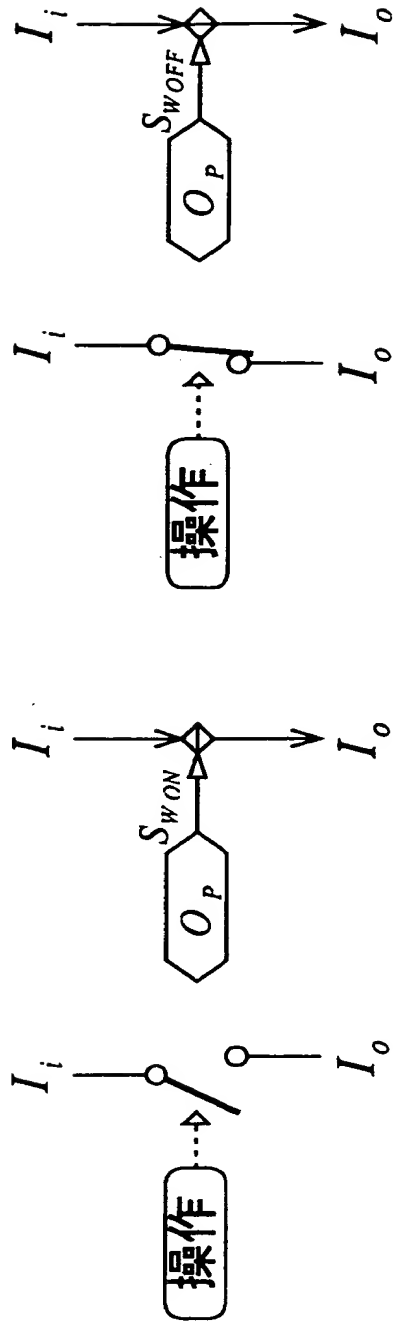
【図 61】

量	操作量		操作・特性値(状態量以外の信号)
	代入量		特性・係数・側負荷値の代入
論理演算子(機能モデル用)	推定観測量		$B_{(k+1)} = A_{(k+1)}$ Bは現在(k)の一つ先標本化周期(k+1)の値を観測する。
	時刻観測		常時: $A = 1$ or $0$ Aが1になる瞬間の実行時刻 $t_{\text{tr}}$ をBに記憶して維持する
	NCスイッチ (常時ON)		常時: $C = 0$ $\text{if } (C = 0) \text{ then } (B = A) \text{ else } (B = 0)$
	NOスイッチ (常時OFF)		常時: $C = 0$ $\text{if } (C = 1) \text{ then } (B = A) \text{ else } (B = 0)$
	論理積		$C = \min(A, B)$ (入力A・Bの小さい方をCとする)
	論理和		$C = \max(A, B)$ (入力A・Bの大きい方をCとする)
非線形演算子(機構モデル用)	絶対値		$B =  A $
	符号		$B = \frac{A}{ A }$
	2乗		$B = A^2$
	初期化(積分)		$\text{if } (C = 0) \text{ then } B = \int A dt$ $\text{else } B = 0$
	畳込み積分		
	標本化		$B_{(k)} = A_{(k-C)}$ (入力Cは標本化のタイミング) $B_{(k)} = A_{(k-1)}$ (入力Cを省略したとき)
	条件判定		$\text{if } (Cond) \text{ then } (B = 1) \text{ else } (B = 0)$ (Cond: 条件判定式)
	関数式		$B = fnc(A)$ (fnc(): 関数名/記号)
	操作		$A = B$ (A: 番号)

【図 6 2】



【図 63】

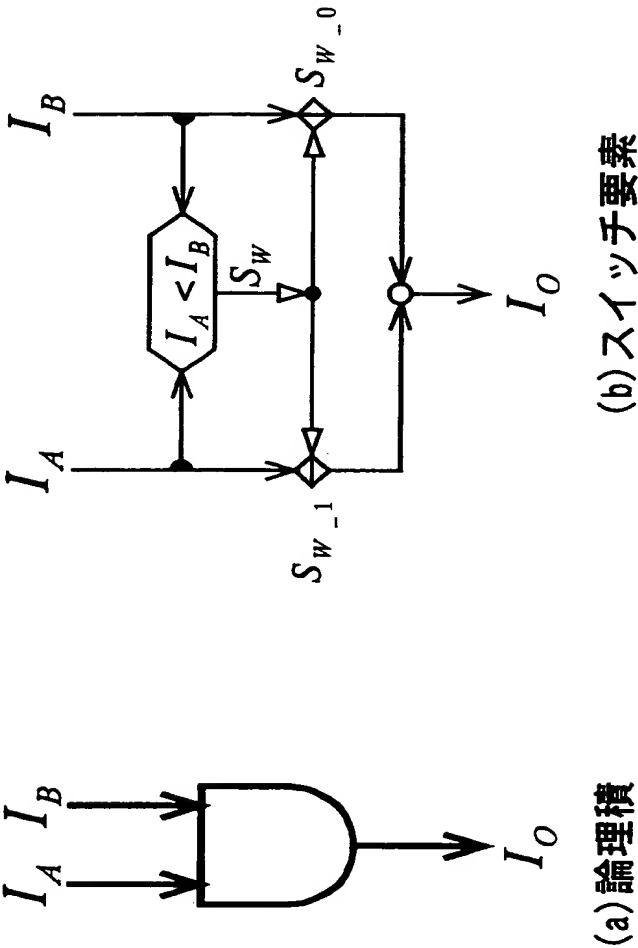


(a) NOスイッチ

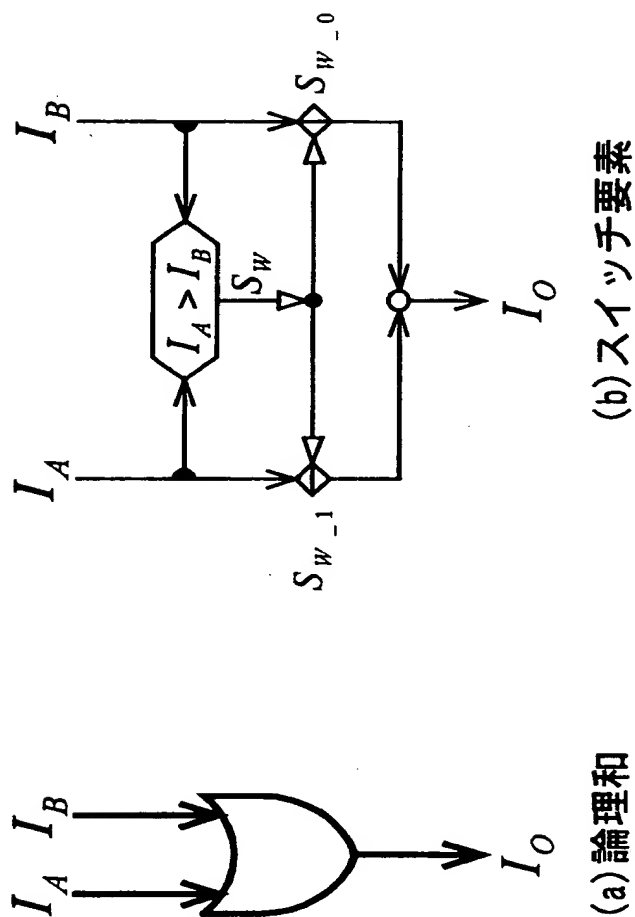
(b) NCスイッチ



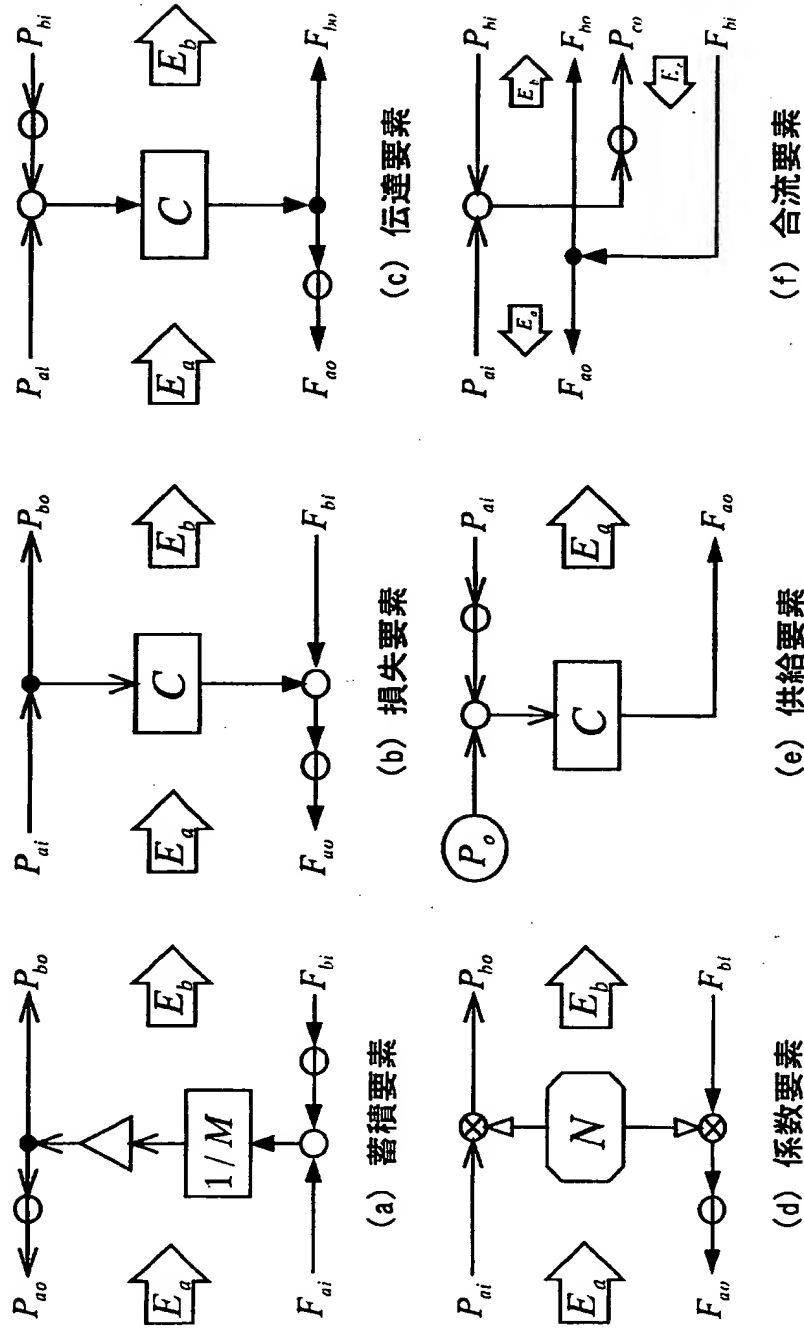
【図 6 4】



【図 6 5】



【图 66】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】本発明は、状態量に非線形変換を施して出力する非線形特性再現装置に関し、製品や部品の非線形な挙動や振る舞いをモデル化して再現する。

【解決手段】入力状態量の、次期標本化時期における推定観測量を入力して、次期標本化時期における出力状態量の推定値が推定観測量で規格化されてなる規格化推定値を求める非線形特性再生部と、非線形特性再生部で求められた規格化推定値に基づく非線形演算により、次期標本化時期における入力状態量を次期標本化時期における出力状態量に変換する状態量変換部とを備えた。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000145806]

1. 変更年月日	1994年 4月19日
[変更理由]	住所変更
住 所	神奈川県横浜市緑区白山一丁目16番1号
氏 名	株式会社小野測器

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 5 9 9 1 4 9 4 0 7 ]

1. 変更年月日 1 9 9 9 年 1 0 月 2 2 日

[変更理由] 新規登録

住 所 広島県広島市安芸区矢野西 1 - 1 5 - 4

氏 名 角田 鎮男

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[597118371]

1. 変更年月日

1997年 8月 6日

[変更理由]

新規登録

住 所

神奈川県鎌倉市津603-61

氏 名

長松 昭男